



TRABAJO FIN DE GRADO

Universidad de Murcia

Facultad de Química

Grado en Física

Año académico 2016-2017

IDENTIFICACIÓN Y CLIMATOLOGÍA DE EPISODIOS DE LLUVIA DE BARRO EN MURCIA

Trabajo realizado por Irene PARDO CANTOS - 48697366H

Tutelado por Luis María BAÑÓN PEREGRÍN y Juan Pedro MONTÁVEZ GÓMEZ.

Agradecimientos

No resulta complicado pensar en todas las personas que me han ayudado durante toda mi etapa académica. Empezando por mi familia, especialmente mis padres y mi hermano, que me ha dado apoyo tanto moral como económico. Rubén, aunque en esta etapa hayas estado lejos, siempre he pensado en ti para coger fuerzas y poder ser como tú algún día. Quiero agradecer enormemente a Jesús todo lo que ha hecho por mí, sobre todo al hacer que me de cuenta de todo de lo que soy capaz.

Tampoco puedo olvidar la gran labor llevada a cabo por todo el personal docente que me ha formado desde los primeros años de mi educación. En especial, me gustaría nombrar a dos "R". El primero, perteneciente al instituto: gracias por enseñarme a comprender mejor las matemáticas y, lo más importante, a divertirme con ellas. El segundo, perteneciente a la universidad: gracias por acrecentar mis ansias de conocimiento y por contagiarme tu amor por la ciencia y la capacidad de enseñar jugando.

En cuanto a la gente que ha aportado en mayor o menor medida una ayuda a este trabajo, cabe destacar a Luis María Bañón Peregrín, meteorólogo de AEMET, gran maestro, persona e incluso amigo. Has hecho que me obsesione con las lluvias de barro y con mirar al cielo a todas horas. Así como a Juan Pedro Montávez Gómez, profesor de la Universidad de Murcia y tutor, junto a Luis, de este trabajo. Gracias por corregir todos mis fallos, enseñarme, ayudarme y animarme a seguir formándome pese a los inconvenientes que surjan en el camino. Agradecer también la ayuda prestada por Juan Ramón Moreta González en calidad de investigador principal de la red AERONET en España. No me olvido de todo el personal de la Delegación Territorial de AEMET en Murcia por haberme acogido con los brazos abiertos desde el primer día y por compartir días tan especiales y poco frecuentes como una nevada en Murcia.

Para finalizar, agradecer a los grandes amigos que me ha aportado el grado, en especial a los Juglares de la Física por haber hecho que este período de mi vida sea inolvidable.

Tener la oportunidad de estudiar y aprender es el mejor regalo que se le puede hacer a quien quieres, porque el conocimiento nos hace grandes y nos ayuda a apreciar lo que nos rodea. Gracias mamá y papá.

Resumen

Las precipitaciones acompañadas de aerosoles minerales, lluvias de barro, tienen cada vez más repercusión social, ecológica y económica. En el caso de la Región de Murcia, cabe destacar el efecto que estas lluvias tienen en el sector agrícola. A raíz del creciente interés del público por este fenómeno, en mayo de 2016 se comenzó la observación sistemática de lluvias y depósitos secos de barro en el observatorio meteorológico de AEMET en Murcia. A partir de los datos obtenidos y el análisis de las respuestas de varios indicadores de presencia de aerosoles, se han formulado tres modelos para estimar los episodios de lluvia de barro en el observatorio en los últimos años.

La metodología ha partido del análisis de los episodios detectados en el período de observación utilizando varias herramientas o indicadores: fotómetro solar de la marca CIMEL, medidores de concentración de PM10 (material particulado inferior a $10\ \mu\text{m}$), modelo de predicción de polvo NMMB (Non-hydrostatic Multiscale Model on the B-grid) del BSC (Barcelona Supercomputing Center), y productos satelitales de detección de aerosoles. Conociendo las limitaciones de cada indicador, se establecieron umbrales, y se plantearon tres métodos de detección que combinan la información aportada por todos ellos. Estos métodos se verificaron con el período de observación mostrando una capacidad de detección del 75 % en el caso del primer método, 83 % en el caso del segundo método y 75 % en el último caso; y un 18 %, 38 % y 18 % de falsas alarmas respectivamente. Además, se ha comprobado que los mejores indicadores (máximo PSS, Peirce Skill Score) son la predicción elaborada por el BSC y por el fotómetro solar.

Aplicando dichos métodos en el período 2013-2017, se observó que el 15 % (método 1), el 32 % (método 2) y el 17 % (método 3) de los episodios de precipitación en el observatorio de Murcia fueron en forma de barro; que el número medio anual de estos episodios varía entre 6,5 y 13, dependiendo del método utilizado; y que el verano y la primavera son las estaciones con más episodios detectados.

Abstract

Rains with mineral aerosols, dust rains, have very important social, ecological and economical effects nowadays. In Murcia, this type of rains affect agriculture significantly. Since the public is more interested in this phenomenon, in May 2016 regular observations of dust rains began in the AEMET meteorological observatory in Murcia. With the data obtained and the analysis of some tools, we have created three methods to estimate the number of dust rains events happened last years in this observatory.

The used methodology started analysing the observed events using several tools: the sun photometer CIMEL, the density of PM10 (particulate matter with a diameter of 10 μm or less), the NMMB/BSC-Dust model (Non-hydrostatic Multiscale Model on the B-grid) of the BSC (Barcelona Supercomputing Center), and the satellites that detect aerosols. Knowing the limitations of each tool, we establish thresholds and, using the information provided by them, we set out 3 forecast methods. This methods were checked using the observational period and they showed a hit rate of the 75 % (first method), 83 % (second method) and 75 % (third method). Besides, they showed the 18 %, 38 % and 18 % of false alarms rate respectively. As well as this, we discovered that forecasts from the BSC model and the sun photometer are the best tools (highest PSS, Peirce Skill Score) to be used for these predictions.

Employing these methods, since January 2013 up to June 2017, we noticed that the 15 % (method 1), 32 % (method 2) and 17 % (method 3) of the total rain events in the observatory of Murcia were dust rains; the annual mean of these events varies between 6,5 and 13, depending on the method; and, the summer and the spring are the seasons with more detected events.

Índice general

1. Introducción	1
2. Datos y metodología	5
2.1. Datos	6
2.1.1. Concentraciones de PM10	6
2.1.2. Medidas del Espesor Óptico de Aerosoles y del exponente de Ångström desde tierra	7
2.1.3. Medidas del Espesor Óptico de Aerosoles desde satélite	11
2.1.4. Modelo de predicción de polvo NMMB/ BSC-Dust	14
2.1.5. Cartografía sinóptica	16
2.1.6. Descripción del período de control	17
2.2. Metodología	21
3. Resultados	25
3.1. Análisis de un episodio de lluvia de barro	25
3.2. Validación en el período de control	29
3.2.1. Evaluación de los modelos	29
3.2.2. Análisis de la capacidad predictiva de los indicadores	33
3.3. Elaboración de la climatología	34

4. Conclusiones	39
5. Referencias bibliográficas	41
Apéndices	44
A. Espesor Óptico de Aerosoles	45
B. Parámetro de Ångström	47
C. Tablas de datos	49
C.1. Datos de 2017	49
C.2. Datos de 2016	50
C.3. Datos de 2015	51
C.4. Datos de 2014	54
C.5. Datos de 2013	57

Capítulo 1

Introducción

Las lluvias de barro, *dust rains* o *red rains* en inglés, son precipitaciones acompañadas de aerosoles minerales. En la Región de Murcia, este tipo de precipitaciones son muy frecuentes por lo que se ha procedido a un estudio detallado para conocer mejor su periodicidad y las características que las definen.

Los aerosoles son partículas microscópicas en estado líquido o sólido que entran en la atmósfera y pueden tener un origen natural o antropogénico [3]. Los aerosoles que ocupan este trabajo son los de origen mineral, más concretamente los procedentes del desierto del Sahara, que son capaces de viajar miles de kilómetros, pudiendo ser detectados en lugares tan lejanos de su origen como lo son el norte de Escocia y de Alemania, es decir, a distancias de 3000 a 4000 km [21]. El tamaño de estos aerosoles puede variar entre partículas con un diámetro inferior a 1 μm hasta partículas con un diámetro superior a 10 μm [3] llegando a alcanzarse los 250 μm en algunos casos [12].

La idea de la realización de este estudio surgió por la demanda de un seguro agrícola que necesitaba conocer la frecuencia de las lluvias de barro en Murcia para poder avalar a sus clientes y responder ante las pérdidas que estas precipitaciones ocasionan.

Se pueden encontrar otros estudios realizados en la Península Ibérica sobre la composición química de estos aerosoles minerales [12] debido a su repercusión en la salud humana. Otros estudios [21] muestran climatologías de episodios de lluvia de barro que han tenido lugar en un período de tiempo concreto y en un punto determinado, realizadas

con observaciones sistemáticas. Sin embargo, en ningún caso se ha encontrado un estudio que analice las intrusiones de polvo sahariano y las consecuentes lluvias de barro de la manera en la que se ha hecho en este trabajo.

En esta memoria se describen tres métodos de predicción de lluvias de barro muy similares, que se han creado y que utilizan varias herramientas de medida o de predicción de presencia de aerosoles minerales. La primera consideración a tener en cuenta es conocer los días en los que hubo precipitación en Murcia. Para ello se ha dispuesto de los datos de precipitación del Observatorio Meteorológico de AEMET en Guadalupe (Murcia). Para cada uno de los días de lluvia en dicho punto en el período de tiempo analizado (1 de enero 2013 - 31 de mayo 2017) se han observado los datos de los diferentes indicadores para poder predecir así si se trata de una lluvia de barro. Además, se han realizado observaciones sistemáticas durante un año (1 de mayo 2016 - 30 de abril 2017) por parte del cuerpo de observadores de AEMET en Murcia para poder verificar cuán de fiable son los métodos de predicción propuestos.

Para poder identificar los aerosoles que invaden la región de estudio como aerosoles minerales procedentes de los desiertos africanos son necesarias dos condiciones indispensables: que la cantidad de aerosoles alcance una alta concentración y que el tamaño de dichos aerosoles sea lo suficientemente grande como para referirse a arena del desierto. Los parámetros que nos aportan dicha información son el Espesor Óptico de Aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés) y el Exponente de Ångström respectivamente. Desde tierra podemos medir ambas cantidades gracias al fotómetro solar de la marca CIMEL. Además, también se han podido utilizar los datos de concentración de PM10 aportados por las estaciones repartidas en 8 puntos de la Región de Murcia. Otra forma de conocer el AOD es desde satélite, herramienta también utilizada en este estudio. Asimismo se ha utilizado el modelo de predicción de polvo NMMB/BSC-Dust para conocer las previsiones de eventos. Sin embargo, no es necesario únicamente una alta concentración de aerosoles sobrevolando la región, sino que también deben darse unas condiciones meteorológicas concretas para asegurar que dichos aerosoles sean de origen africano y que se vayan a producir precipitaciones en forma de lluvia, pues este trabajo trata las famosas lluvias de barro y no simplemente las invasiones de aerosoles minerales. Por lo tanto, también se

han analizado los mapas de las situaciones sinópticas para conocer mejor la dirección de los vientos y así, el origen de tales aerosoles.

El principal objetivo de este estudio es identificar los episodios de lluvia de barro en Murcia y realizar una climatología de los mismos. Para ello se han creado tres métodos de detección de dichas precipitaciones a partir de varias herramientas de medida o de predicción, en el caso del modelo NMMB/BSC-Dust. De esta manera podremos analizar cualquier situación del pasado en la que hubo precipitación en un punto concreto, siempre que se disponga de las herramientas necesarias para tal estudio. Permitiendo conocer así el número de episodios de lluvias de barro que han tenido lugar a partir de los registros de precipitación.

El presente trabajo está estructurado como sigue. El Capítulo 2 presenta los datos recogidos en el período de control y la metodología aplicada, así como una pequeña descripción de cada uno de las herramientas empleadas. En el Capítulo 3 se muestran los métodos aplicados a los datos y las tablas de contingencia obtenidas a partir de ellos, el análisis estadístico que nos permitirá elegir el método más apropiado para futuros estudios, así como la comparación de la capacidad predictiva de cada una de las herramientas utilizadas. En este mismo capítulo, se muestran los porcentajes de lluvias de barro sobre el total de precipitaciones registradas en la Estación Meteorológica de AEMET en Guadalupe (Murcia) según cada uno de los 3 métodos de predicción, las estaciones del año y meses en los que aparecen estas lluvias con más frecuencia y, por último, el número medio anual de eventos detectados en Murcia. Finalmente, el Capítulo 4 recoge las conclusiones extraídas tras la realización del estudio.

Capítulo 2

Datos y metodología

Para que las lluvias de barro tengan lugar en un punto concreto, son necesarios dos componentes principales: una situación sinóptica apropiada que favorezca la intrusión o generación de aerosoles minerales y la existencia de precipitaciones en forma de lluvia.

La primera consideración que se ha tenido para la realización de este trabajo ha sido seleccionar los días de precipitación para, posteriormente, observar los datos de los distintos indicadores para cada uno de los días del episodio. Para definir un episodio de lluvia de barro se han considerado: el día de la precipitación (d), dos días anteriores ($d - 1$ y $d - 2$) y un día posterior ($d + 1$). Se considera que es necesario analizar, sobre todo, los dos días previos al día de la precipitación ya que el transporte de polvo africano comienza unos días antes al día de la lluvia de barro, como se podrá observar más adelante en los mapas de las situaciones sinópticas de cada uno de los episodios. El hecho de estudiar los datos un día después de la precipitación es para conocer si aún quedan restos de aerosoles minerales en la atmósfera o si la nube de polvo se ha alejado de la región de estudio. En varias ocasiones, el registro de la concentración de PM10 aparece más elevado un día después al de la lluvia de barro, ya que este se ha depositado en los medidores.

La observación sistemática por parte del cuerpo de observadores de AEMET en Murcia ha sido fundamental para la realización de este estudio ya que ha permitido comprobar la fiabilidad de los métodos de predicción propuestos. Para dicha observación se colocó horizontalmente una placa negra en la azotea del edificio donde poder detectar con facilidad los posibles restos de lluvia de barro. Se realizaron dos observaciones al día, cada

12 horas, desde el 1 de mayo de 2016 hasta el 30 de abril de 2017. Esto permitió un mejor control de los episodios ya que se anotaron las características tanto de los eventos de lluvia de barro como de los días en los que aparecía depósito seco. Estas observaciones siguen realizándose para ser utilizadas en futuras investigaciones.

2.1. Datos

Para la detección de los aerosoles se han utilizado varios instrumentos de medida, así como un modelo de predicción de polvo, que nos han permitido crear los tres métodos de detección de eventos de lluvia de barro pasados y que se describen en la siguiente sección del presente capítulo. Para la interpretación de los datos de cada una de las herramientas, indicadores o medidores se han establecido unos umbrales, teniendo en cuenta sus limitaciones y las comparaciones realizadas entre los datos. Todas estas consideraciones se comentarán, a continuación, en la explicación detallada de cada uno de ellos. También se indicarán las fechas del comienzo de cada uno de los indicadores utilizados para conocer así hasta cuándo se podría realizar la climatología. Las herramientas de medida y predicción utilizadas han sido: las concentraciones de PM10, el fotómetro solar CIMEL, las observaciones desde satélite y un modelo de predicción de polvo.

2.1.1. Concentraciones de PM10

Las PM10 son partículas con diámetros inferiores a $10\ \mu m$ que pueden ser transportadas varios cientos de kilómetros por el viento antes de depositarse en el suelo [3]. Las mediciones de la calidad del aire se muestran como concentraciones de estas partículas expresadas en $\mu g/m^3$. Gracias a los datos aportados por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de la Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente de la Región de Murcia [8] se han podido conocer estos niveles de PM10 en 8 estaciones automáticas repartidas por toda la Región. Dichas estaciones se encuentran en Lorca (desde mayo 1998), San Basilio (Murcia) (desde mayo 2002), Aljorra (desde octubre 2004), Alumbres (desde noviembre 2004), Mompeán (desde enero 2006), Escombreras (desde junio 2007), Caravaca (desde noviembre 2007) y Alcantarilla (desde junio 2010).

En el término municipal de Cartagena existen 4 estaciones debido a la gran contaminación de la zona, pues estas estaciones no sólo son capaces de medir concentraciones de PM10, sino también ozono, NO₂ y otros contaminantes. Debido a que en esta comarca encontramos la mitad de las estaciones de toda la Región de Murcia, se ha establecido el criterio de que debe haber al menos 4 estaciones donde la media diaria de concentración de PM10 supere los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para que se considere que hay un aumento singular de aerosoles en la región.

Para conocer la concentración en masa de PM (material particulado) que llega a un punto en concreto se utiliza un método gravimétrico que puede contabilizar tanto las PM10 como las PM2.5. Se han utilizado los registros de las primeras ya que estas incluyen también a las segundas. Este método consiste en el muestreo del aire ambiente durante 24 horas. El aire atraviesa un filtro que sólo deja pasar aquellas partículas con un diámetro inferior a 10 μm . Así, conociendo la masa de las PM10 depositadas y el volumen total del muestreo recogido se puede calcular la concentración de las mismas [14].

La principal función de estas estaciones automáticas es conocer la concentración de contaminantes que existen en la Región de Murcia. Por lo tanto, podría pensarse que los datos obtenidos pueden ser confusos y no coincidir con episodios de intrusión de aerosoles minerales. Sin embargo, aunque dichos valores varíen y haya días en los que estos aumenten notablemente, cuando se trata de un episodio importante de intrusión de polvo es fácil diferenciarlo ya que se observa un aumento abrupto de los valores de PM10 que indican que una nube de polvo sahariano invade nuestra región. En algunas ocasiones, la detección de aerosoles por parte de estas estaciones aparece al día siguiente al de la lluvia de barro, como se ha comentado anteriormente.

2.1.2. Medidas del Espesor Óptico de Aerosoles y del exponente de Ångström desde tierra

Otro de los dispositivos utilizados para la detección de aerosoles es el fotómetro solar CIMEL. Estos fotómetros permiten estimar las características ópticas de los aerosoles atmosféricos. Se ha utilizado el fotómetro situado en la azotea de la Delegación Territorial

de AEMET en Guadalupe (Murcia) (*Figura 2.1*). Gracias a él se han podido obtener los datos de Espesor Óptico de Aerosoles (AOD o AOT por sus siglas en inglés) y del exponente de Ångström (α).



Figura 2.1. Fotómetro solar CIMEL situado en la azotea de la Delegación Territorial de AEMET en Murcia.

Tanto los datos de AOD como los de α han sido obtenidos de la página web de AERONET [15] que es la red mundial de fotómetros CIMEL creada por la NASA. Actualmente existen 833 fotómetros en la red de AERONET distribuidos por los 6 continentes (*Figura 2.2*), de los cuales 6 se encuentran en diferentes ciudades de España (A Coruña, Zaragoza, Madrid, Palma de Mallorca, Murcia e Izaña (Tenerife)) [2]. El fotómetro solar se instaló en Murcia en septiembre de 2012.

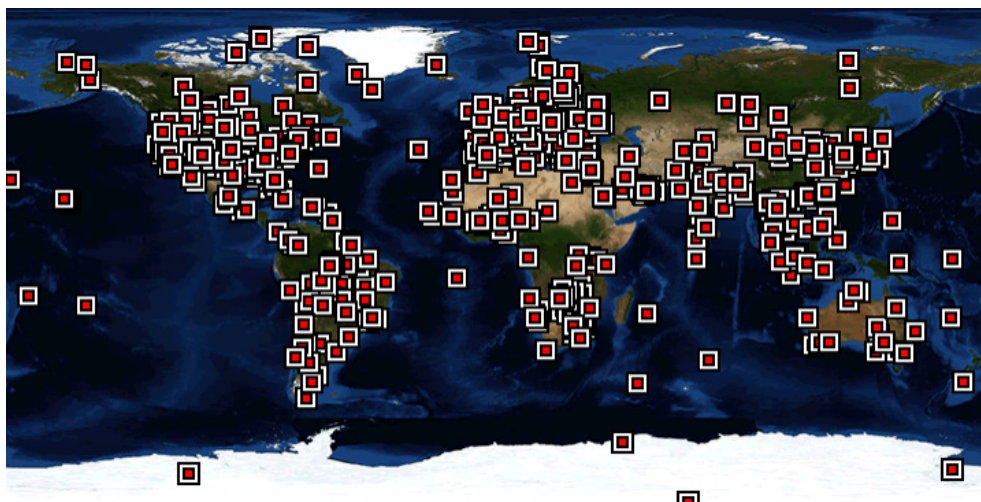


Figura 2.2. Situación de los fotómetros solares Cimel de la red mundial de AERONET [15].

Los datos de AERONET vienen dados en 3 niveles de calidad: 1.0, 1.5 y 2.0. El nivel 1.0 contiene los datos en crudo que simplemente han pasado un filtro para descartar los

efectos más notables como pueden ser nubes espesas o mal apuntamiento, pero no distingue la nubosidad más fina que deja pasar la radiación. El nivel 1.5 utiliza los datos del nivel 1.0 y les aplica un algoritmo para descartar la presencia de nubes. Por último, el nivel 2.0 es el nivel de calidad más alto y contiene los datos del nivel 1.5 calibrados manualmente [15]. Se han utilizado los datos correspondientes al nivel 1.5 de calibración ya que la calibración 2.0 sólo ha sido aplicada hasta enero de 2016 y no se podrían comparar correctamente los datos antiguos con los más recientes.

Espesor Óptico de Aerosoles

El AOD es la medida de aerosoles contenidos en una columna de aire desde el fotómetro (superficie terrestre) hasta lo alto de la atmósfera ya que expresa la pérdida de radiación por absorción o dispersión [1]. El fotómetro solar mide el voltaje (V) que es proporcional a la irradiancia espectral que le llega. La irradiancia espectral estimada de lo alto de la atmósfera, es decir, la producida directamente por el Sol (medida en términos de voltaje V_0) se obtiene de las medidas del fotómetro solar en el Observatorio Mauna Loa en Hawaii [1]. El espesor óptico se obtiene con la siguiente ecuación siguiendo la ley de Beer-Lambert-Bouguer [1]:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda)d^2 \exp[-m\tau(\lambda)_{TOT}] \quad (2.1)$$

donde $V(\lambda)$ es el voltaje atenuado medido para la longitud de onda λ , d es la distancia media Tierra-Sol actual, m es la masa de aire y τ_{TOT} es el espesor óptico total. El signo negativo de la exponencial se debe a que la radiación disminuye conforme esta atraviesa la atmósfera [7].

Para ángulos solares θ_s inferiores a 75° , la masa de aire se puede aproximar por

$$m = \frac{1}{\cos\theta_s} \quad (2.2)$$

ya que en el orto y el ocaso el Sol se encuentra muy cerca del horizonte y la masa de aire atravesada es mucho mayor [7].

Ese espesor óptico total contiene otros constituyentes que también dispersan la luz como el vapor de agua, el ozono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de carbono o el

metano. Además, también hay que tener en cuenta la dispersión Rayleigh. Así que el espesor óptico de aerosoles (AOD) está contenido en ese τ_{TOT} [5]:

$$\tau(\lambda)_{Aerosol} = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_{Rayleigh} - \tau(\lambda)_{H_2O} - \tau(\lambda)_{O_3} - \tau(\lambda)_{NO_2} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \tau(\lambda)_{CH_4} \quad (2.3)$$

Para una descripción más detallada del cálculo de AOD consúltese el *Apéndice A*.

El fotómetro situado en la Delegación Territorial de AEMET en Guadalupe mide el AOD en varias longitudes de onda: 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm y 340 nm. Se han utilizado los datos correspondientes a $\lambda = 500$ nm por ser recomendada por Juan Ramón Moreta González, operador de la red AERONET en España.

Para el establecimiento del umbral de los datos de AOD se consultó a Juan Ramón Moreta González, quien aconsejó un valor medio diario igual o superior a 0.3, umbral elegido tras el análisis de los registros históricos. Por lo tanto, un espesor óptico de aerosoles superior a este límite indica una alta concentración de los mismos, aunque no tiene por qué deberse a aerosoles de origen mineral. Para ello también es necesario que estos sean de un tamaño considerable, dato que viene dado por el parámetro de Ångström.

Exponente de Ångström

El tamaño de los aerosoles puede estimarse del espesor óptico de aerosoles, normalmente comparando las respuestas en las longitudes de onda de 440 nm y 870 nm. La pendiente negativa (o primera derivada) de AOD con la longitud de onda en escala logarítmica es conocida como el parámetro, exponente o coeficiente de Ångström (α) [1].

$$\alpha = -\frac{d(\ln \tau_a)}{d(\ln \lambda)} \quad (2.4)$$

donde τ_a es el espesor óptico de aerosoles y λ la longitud de onda.

Para una descripción más detallada del cálculo de AOD consúltese el *Apéndice B*.

Este parámetro se calcula con dos o más longitudes de onda. Cuando el tamaño de las partículas disminuye, el coeficiente de Ångström aumenta [7]. El valor máximo de α es igual a 4 y corresponde a moléculas. Para el polvo sahariano, este coeficiente es muy bajo, incluso negativo [7]. Por lo tanto, se ha establecido un umbral de $\alpha \leq 0,8$

para considerar que las partículas en suspensión son del tamaño suficiente para tratarse de aerosoles minerales. Se ha elegido este valor de α del mismo modo que el del AOD: tras la consulta al investigador principal de la red AERONET en España.

Ambas magnitudes (τ_a y α) son adimensionales. Así, los datos que superen los umbrales de $\tau_a \geq 0,3$ y $\alpha \leq 0,8$ podremos decir que muestran la presencia de aerosoles minerales ya que son necesarias las dos condiciones: gran concentración de aerosoles (τ_a alto) y partículas de un tamaño considerable (α bajo).

2.1.3. Medidas del Espesor Óptico de Aerosoles desde satélite

En cuanto a los productos satelitales se han utilizado 2 diferentes: los proporcionados por los satélites polares Terra/MODIS y Aqua/MODIS de la NASA [16] y por el satélite geoestacionario de EUMETSAT [23].

Satélites Terra y Aqua

Los satélites Terra y Aqua (conocidos originalmente como EOS AM-1 y EOS PM-1 respectivamente) tienen un espectroradiómetro integrado, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), diseñado para el análisis de la radiación producida por el sistema Tierra-atmósfera [13]. El satélite Terra fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 y su órbita alrededor de nuestro planeta está programada para que pase de norte a sur por el ecuador por la mañana [17]. El satélite Aqua fue lanzado el 4 de mayo de 2002 y su órbita pasa de sur a norte por el ecuador por la tarde [17] (*Figura 2.3*). Los Terra MODIS y Aqua MODIS toman datos en 36 bandas espectrales, variando entre valores de longitudes de onda de $0,4 \mu\text{m}$ a $14,4 \mu\text{m}$. El espectroradiómetro utiliza las bandas de la 1 a la 7 y la 20 para la medida de los aerosoles [13], [17]. Estos datos ayudan a conocer, a una gran y diversa comunidad de usuarios de todo el mundo, la dinámica atmosférica y los procesos que ocurren en la tierra y los océanos.

Se han utilizado estos satélites para observar los datos del Espesor Óptico de Aerosoles proporcionados por la NASA [16]. En dicha plataforma existe un producto para indicar los distintos espesores ópticos en diferentes colores. Además, cuando se trata de

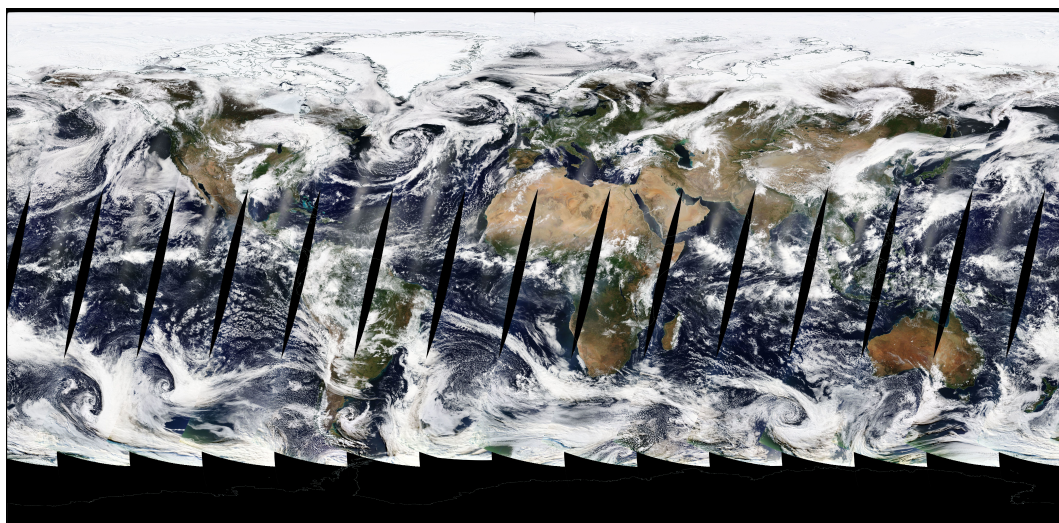


Figura 2.3. Trayectorias seguidas por los satélites Terra y Aqua de polo a polo. *RGB Visible True Color*. [16]

un episodio muy intenso, como el ocurrido en febrero de 2017, no es necesario utilizar esta herramienta para percibir la presencia de polvo sahariano invadiendo la Península Ibérica, como se muestra en la *Figura 2.4*.

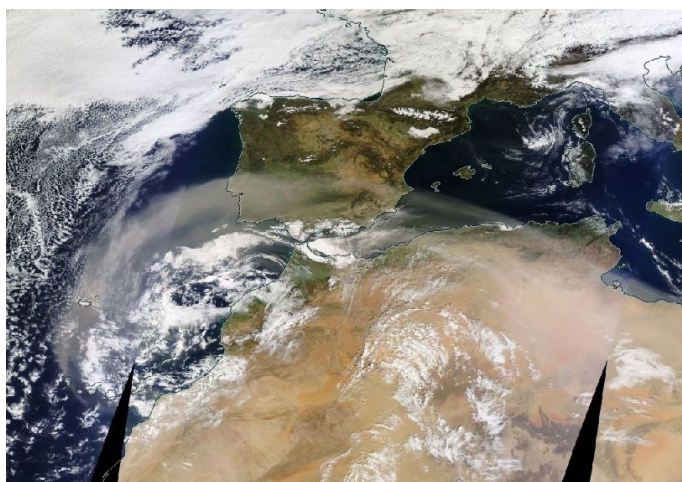


Figura 2.4. Evento de invasión de polvo africano acompañado de lluvias de barro los días 23 y 24 de febrero 2017 en gran parte de la Península Ibérica (Imagen del 21 de febrero 2017). *RGB Visible True Color*. [16]

Cuando percibamos un AOD igual o superior a 0.3 (al igual que en el caso del fotómetro solar CIMEL) en cualquiera de los dos satélites, Terra o Aqua, en el entorno del observatorio de Murcia, consideraremos que la concentración de aerosoles es lo suficientemente elevada como para producir una lluvia de barro.

Satélite MSG

El producto *dust* del satélite geoestacionario MSG (Meteosat de Segunda Generación) de EUMETSAT es uno de los productos generados por la composición de colores RGB (*Red, Green, Blue*) de 3 canales. Este producto ha sido diseñado para observar la evolución de las tormentas de arena de los desiertos [10]. Por lo que nos ha sido muy útil para visualizar las grandes masas de polvo que invaden nuestra región. Sin embargo, cuando se trata de un evento más débil, este producto no es de gran utilidad ya que no permite observar el polvo cuando las concentraciones no son muy grandes. En estas situaciones, nos hemos servido únicamente de los satélites Terra y Aqua descritos anteriormente.

El satélite Meteosat-10 de EUMETSAT proporciona una imagen cada 15 minutos y el polvo aparece coloreado en rosa o magenta en la combinación RGB. Este satélite fue lanzado el 5 de julio de 2012 [9]. En la *Figura 2.5*, utilizada como ejemplo, también se pueden observar otros objetos como las tierras áridas que aparecen en azul claro (durante el día) y en verde claro (durante la noche), nubes gruesas y altas que aparecen en marrón rojizo y nubes delgadas y altas que aparecen en tonos muy oscuros, casi negros [10].

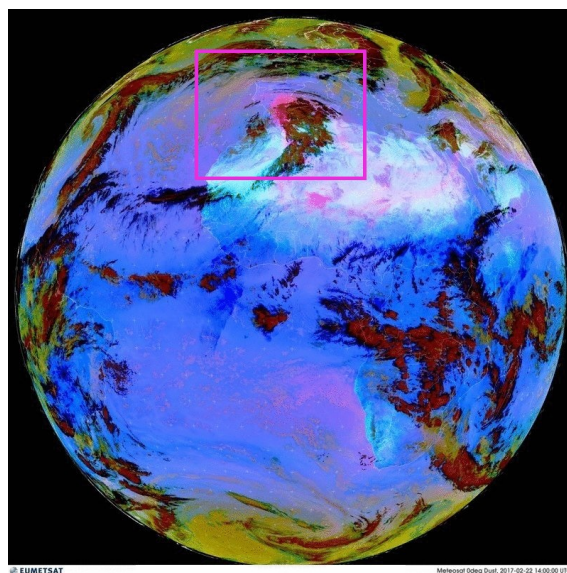


Figura 2.5. Imagen del producto *dust* del MSG. En el recuadro se observa un evento de invasión de polvo africano acompañado de lluvias de barro en gran parte de la Península Ibérica (22 febrero 2017 a las 14:00:00 UCT). RGB. [23]

La combinación RGB utiliza la diferencia de temperatura de brillo entre la superficie

terrestre y las nubes de aerosoles utilizando los siguientes canales: IR12.0-IR10.8, IR10.8-IR8.7 e IR10.8 [10]. La primera diferencia se representa en rojo, la segunda en verde y el IR 10.8 puro en azul [10]. Así se compara la temperatura de brillo de la superficie y de las nubes, determinándose la cantidad de aerosoles atmosféricos, ya que estos absorben o dispersan la radiación disminuyendo la temperatura detectada [10].

Se ha utilizado este producto para observar la presencia de grandes nubes de polvo que invaden la Península Ibérica. Como se ha comentado anteriormente, cuando la intrusión no es muy fuerte, la detección del polvo mediante esta herramienta es complicada, así que se utilizarán únicamente los satélites descritos en el apartado anterior de esta misma sección. Así, con que se detecte la presencia de aerosoles o de polvo en alguno de los satélites (Terra, Aqua o MSG) cumpliendo los umbrales establecidos, se considera que la presencia de polvo es suficiente.

2.1.4. Modelo de predicción de polvo NMMB/ BSC-Dust

La última herramienta utilizada en este estudio ha sido el modelo NMMB/ BSC-Dust. Se trata de un modelo atmosférico multiescala de polvo, diseñado y desarrollado en el BSC (Barcelona Supercomputing Center) en colaboración con el NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), el Goddard Institute for Space Studies de la NASA y el IRI (International Research Institute for Climate and Society) [4]. Este modelo es un desarrollo del modelo DREAM (Dust REgional Atmospheric Modeling System) creado en 2001 [18], que luego se desarrolla acoplado al modelo meteorológico NMMB (Non-hydrostatic Multiscale Model on the B-grid) en 2006 [6]. Los últimos desarrollos se realizaron en 2011 y 2012 [4].

Este modelo estima que la mayor emisión de polvo proviene de los desiertos norteafricanos (50-70 %) y asiáticos (10-25 %) [20] aportando predicciones de tiempo y de polvo a corto y medio alcance.

Como se puede observar en la *Figura 2.6*, el modelo muestra el espesor óptico de aerosoles minerales previsto, con un intervalo entre 0.1 y 6.4.

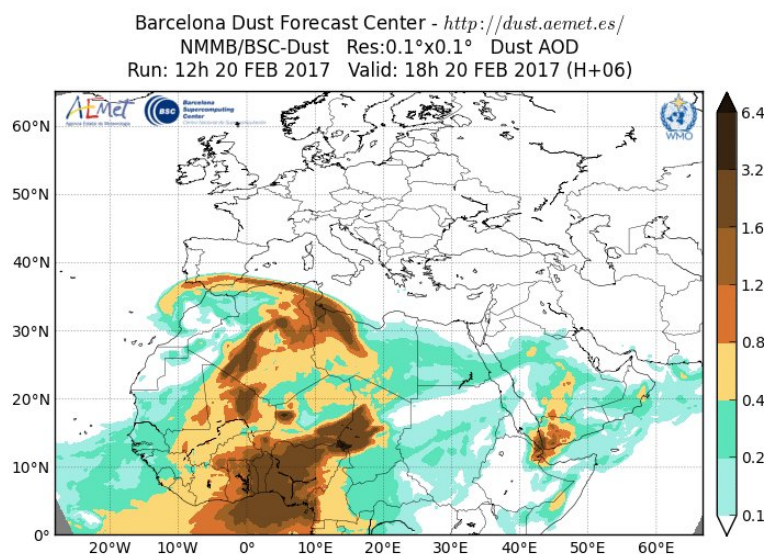


Figura 2.6. Imagen del modelo NMMB/BSC-Dust donde se muestran los distintos AOD previstos (20 febrero 2017). [4]

En este trabajo se ha utilizado este modelo para conocer las predicciones de intrusiones de polvo sahariano. Se ha establecido el criterio de que por poca que sea la concentración de aerosoles minerales incidentes prevista en la región de estudio, esta será suficiente para aportar una evidencia de lluvia de barro en dicha región, aunque sea de poca relevancia. En un principio se estableció que el AOD debía ser superior a 0.2, pero tras muchas observaciones se concluyó que con que el modelo muestre el mínimo de AOD (0.1), se corresponde con una posible lluvia de barro si ese mismo día se dan precipitaciones.

Todas las herramientas que acabamos de describir junto con sus umbrales, son los elementos que nos determinarán si las precipitaciones que tuvieron lugar en Murcia un día concreto del pasado fueron de barro o no. Además, también nos puede servir para conocer si las lluvias previstas para los próximos dos días serán de barro, pues todos los aparatos de medida detectarán (o preverán, en el caso del modelo NMMB/BSC-Dust) la presencia de aerosoles los días previos a la precipitación.

Otra herramienta a tener en cuenta son los mapas meteorológicos de las situaciones sinópticas, ya que en ellos veremos la distribución de presiones de la atmósfera, lo que nos ayudará a determinar la dirección del viento y a conocer el origen de los aerosoles detectados sobre la región de estudio.

2.1.5. Cartografía sinóptica

En este último apartado se presentan las situaciones sinópticas que se dieron en los eventos ocurridos durante el período de observación. Para ello se ha dispuesto de los mapas aportados por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio, ECMWF, por sus siglas en inglés (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [11].

Tras el análisis de las situaciones meteorológicas previstas para los eventos observados del período de control se han clasificado dos tipos principales:

- Una vaguada, convertida posteriormente en borrasca, situada al noroeste/oeste de la Península Ibérica que se desplaza hacia el suroeste, induciendo vientos de sur/suroeste sobre la Región de Murcia.
- Un centro de altas presiones (anticiclón) al sur de la Península Ibérica, induciendo vientos de sur/suroeste sobre la Región de Murcia.

En las *Figuras 2.7 y 2.8* se muestra un ejemplo de cada uno de los dos tipos de situaciones sinópticas explicadas anteriormente. Las líneas negras son las isohipsas que muestran la altura geopotencial a 500 hPa, las grises muestran la presión reducida a nivel del mar y en colores aparece representada la temperatura a 850 hPa.

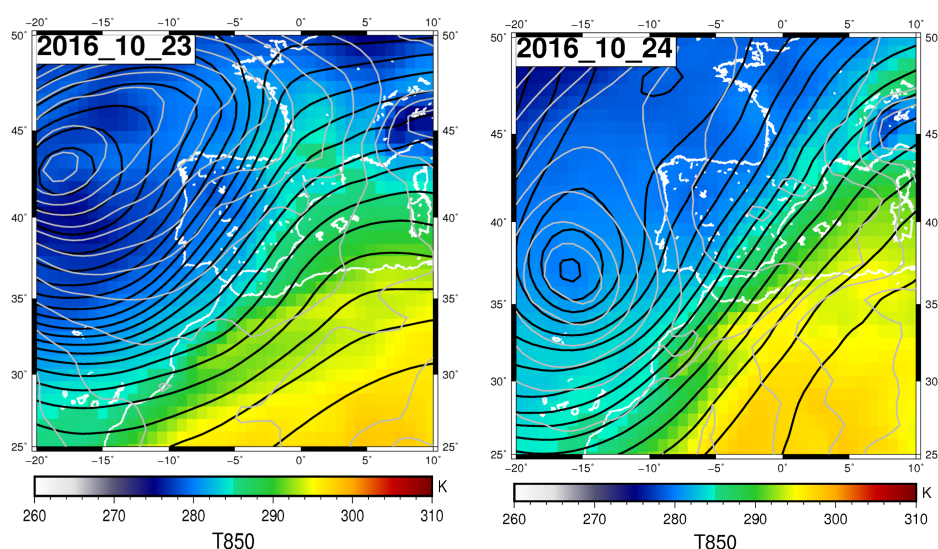


Figura 2.7. Mapas de las situaciones sinópticas del episodio de lluvia de barro observado en octubre 2016. En negro aparecen las isohipsas a 500 hPa, en gris, la presión reducida a nivel del mar y, en colores, la temperatura a 850 hPa. [11]

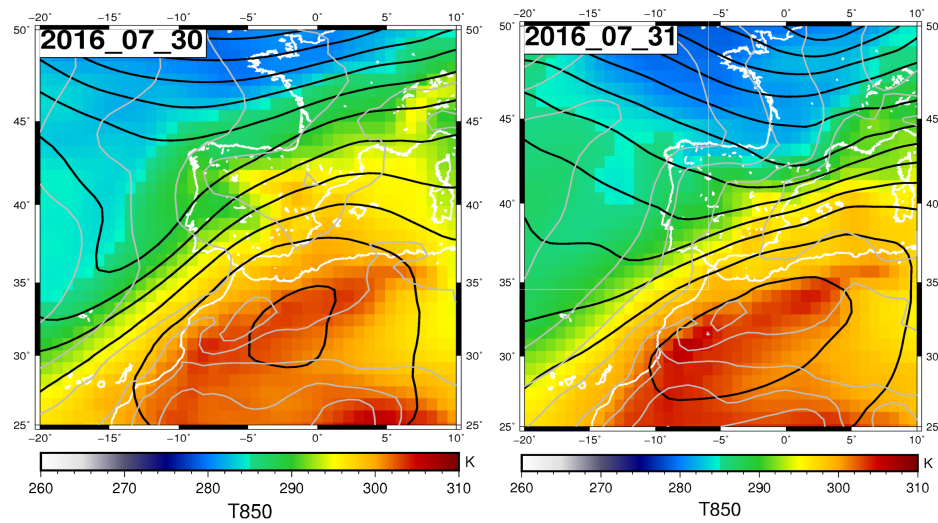


Figura 2.8. Mapas de las situaciones sinópticas del episodio de lluvia de barro observado en julio-agosto 2016. En negro aparecen las isohipsas a 500 hPa, en gris, la presión reducida a nivel del mar y, en colores, la temperatura a 850 hPa. [11]

Como cabe esperar, es necesario que existan vientos de componente sur para que se produzca tal invasión. Sin embargo, en algunas situaciones, el polvo del desierto no viene directamente hacia la Península, sino que viaja hacia las Islas Canarias y, posteriormente, vira hacia el noreste.

2.1.6. Descripción del período de control

En este apartado se muestran las fechas (*Tabla 2.1*) de los episodios del período de control (1 de mayo 2016 - 30 de abril 2017) así como los datos aportados por cada uno de los indicadores utilizados para su detección (*Tabla 2.2*).

A continuación se detalla cada una de las columnas que aparecen en las tablas de datos:

- **AOD:** Datos del Espesor Óptico de Aerosoles en $\lambda = 500$ nm aportados por el fotómetro solar CIMEL. Valor de la media diaria máxima de los días de cada episodio. Nivel 1.5 de calibración.
- **α :** Datos del Exponente de Ångström aportados por el fotómetro solar CIMEL (calculado con $\lambda = 440$ nm y $\lambda = 870$ nm). Valor de la media diaria mínima de los

Episodio	Fecha	Día observación
1	3-6 mayo 2016	5 mayo 2016
2	26-30 junio 2016	28 y 29 junio 2016
3	5-9 julio 2016	7 y 8 julio 2016
4	18-21 julio 2016	20 julio 2016
5	29 julio-2 agosto 2016	31 julio y 1 agosto 2016
6	14-17 agosto 2016	16 agosto 2016
7	26-30 agosto 2016	28 y 29 agosto 2016
8	22-26 octubre 2016	24 y 25 octubre 2016
9	10-14 febrero 2017	12 y 13 febrero 2017
10	21-25 febrero 2017	23 y 24 febrero 2017
11	2-5 marzo 2017	4 marzo 2017
12	3-6 abril 2017	5 abril 2017

Tabla 2.1. Fechas de los episodios del período de control.

días de cada episodio. Nivel 1.5 de calibración.

- **BSC:** Valor máximo de AOD previsto por el modelo NMMB/BSC en alguno de los días del episodio.

Como en el modelo del BSC hay varios intervalos de valores de AOD se han clasificado como sigue: **intervalo 1:** $0,1 < \text{AOD} < 0,2$; **intervalo 2:** $0,2 < \text{AOD} < 0,4$; **intervalo 3:** $0,4 < \text{AOD} < 0,8$; **intervalo 4:** $0,8 < \text{AOD} < 1,2$; **intervalo 5:** $1,2 < \text{AOD} < 1,6$; **intervalo 6:** $1,6 < \text{AOD} < 3,2$; **intervalo 7:** $3,2 < \text{AOD} < 6,4$.

En las tablas de datos se mostrará el número correspondiente al intervalo de AOD máximo observado en el modelo para alguno de los días de los episodios definidos.

- **SAT:** Satélites polares y geoestacionario que indican valores de AOD superiores a 0.3 en algún momento del episodio. Cuando se indica SI, significa que todos los satélites detectan aerosoles, mientras que cuando aparece entre paréntesis una de las dos agencias (NASA o EUMETSAT), representa la detección de aerosoles por una de ellas pero no por ambas.

- **PM10:** Se necesita un máximo local en la concentración de PM10 superior a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 4 o más estaciones en alguno de los días del episodio para tenerlo en cuenta (y marcar con un SI) en las tablas de datos.

Episodio	AOD	α	BSC	SAT	PM10
1	0.206	1.141	1	NO ¹	NO
2	0.468	0.237	3	SI (NASA)	NO
3	0.400	0.170	3	SI (NASA)	NO
4	0.921	0.126	4	SI	SI
5	0.389	0.285	3	NO	SI
6	0.574	0.156	2	SI	SI
7	0.580	0.294	2	SI (NASA)	NO
8	0.610	0.121	3	SI (NASA)	SI
9	0.303	0.140	2	SI (EUMETSAT)	SI
10	1.773	0.149	6	SI	SI
11	0.126	0.052	2	SI (NASA)	NO
12	0.234	1.106	0	NO	NO

Tabla 2.2. Datos de los episodios de lluvia de barro observados en el período de control.

En la *Tabla 2.3* se presentan los días en los que hubo precipitación durante el período de control pero en los que no se observó lluvia de barro por parte del cuerpo de observadores de la Delegación Territorial de AEMET en Murcia. Aunque en la tabla se muestren los días exactos en las que hubo precipitación, a la hora de analizar cada uno de los eventos se ha seguido el mismo procedimiento descrito anteriormente, visualizando así los datos de los dos días previos y del día posterior al de la lluvia.

Para la visualización de las tablas de datos de todo el período estudiado (enero 2013 - junio 2017) consúltase el *Apéndice C*.

¹No se pudo realizar medida por presencia de nubes.

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
7-12/05/2016	0.158	1.021	0	NO ¹	NO
28/05/2016	0.212	0.734	0	SI (NASA)	SI
04/06/2016	0.204	1.35	0	SI (NASA)	NO
10/08/2016	0.041	1.148	0	NO	NO
21/08/2016	0.264	1.039	0	SI (NASA)	NO
13/09/2016	0.277	1.169	0	SI (NASA)	NO
20/09/2016	0.190	1.497	0	NO	NO
28-29/09/2016	0.142	0.984	0	NO	NO
09/10/2016	0.378	0.953	0	SI (NASA)	NO
12-14/10/2016	0.210	0.865	0	NO	NO
18-20/10/2016	0.277	0.348	0	SI (NASA)	NO
28/10/2016	0.261	1.306	1	SI (NASA)	NO
2-6/11/2016	1.655	-0.064	1	SI (NASA)	SI
20-23/11/2016	0.118	1.424	0	SI (EUMETSAT)	NO
27/11/2016	0.060	1.708	0	NO ¹	NO
30/11-6/12/2016	0.271	0.513	0	NO	NO
8-9/12/2016	0.142	1.305	0	NO	NO
15-19/12/2016	0.241	1.494	0	NO	NO
18-21/01/2017	0.205	0.466	0	NO	NO
02/02/2017	0.157	0.690	0	NO	NO
18-19/02/2017	0.224	1.123	0	SI (NASA)	NO
12-14/03/2017	0.211	0.600	2	SI (NASA)	NO
25/04/2017	0.362	0.413	2	SI (NASA)	SI
27-29/04/2017	0.216	0.917	0	SI (NASA)	SI

Tabla 2.3. Datos de los días de precipitación sin observación de barro en el período de control.

2.2. Metodología

Para la creación de una climatología de las lluvias de barro en Murcia, inicialmente se creó un método discreto de detección teniendo en cuenta todos los indicadores descritos en la sección anterior. Posteriormente se consideró necesaria la creación de otros dos métodos, los cuales se detallarán a continuación.

Estos tres métodos son capaces de detectar episodios de barro que ocurrieron en el pasado. Para ello, se han creado unas tablas a partir de los datos aportados por cada una de las herramientas utilizadas. Al ser estos métodos discretos, se trata de apuntar 1 (ó 0) en el caso de que sí (o no) se superen los umbrales fijados. Así, tras la suma de las aportaciones de todos los indicadores, se ha establecido que se trata de un episodio de lluvia de barro cuando se hayan superado los umbrales de un mínimo de indicadores.

El **primer método** diseñado tiene en cuenta a todos los medidores por igual, es decir, considera la medida del AOD, el exponente de Ångström, ambos por parte del fotómetro solar CIMEL, el modelo de predicción de polvo NMMB/ BSC-Dust, la detección de aerosoles por parte de los satélites tanto polares como geoestacionarios y las concentraciones de PM10. Así tendremos un total de 5 indicadores y, para considerar que se trata de una lluvia de barro, es necesario que 4 o todos ellos superen los umbrales. Se ha establecido este criterio, quizás algo restrictivo, porque tras el análisis del período de control de un año donde han sido anotados todos los episodios de lluvia de barro, se ha observado que si se tuviesen en cuenta aquellos días en los que menos de 4 medidores son positivos, tendríamos muchas falsas alarmas, empeorando así nuestro método de detección. En cambio, si estableciésemos que es necesario que los 5 medidores tienen que superar los umbrales, perderíamos algunos de los eventos observados y que, por alguna razón, alguno de los indicadores no ha superado los límites fijados.

El **segundo método** no tiene en cuenta los datos del CIMEL, por lo tanto, la suma total de medidores será 3 (modelo NMMB/ BSC-Dust, satélites y concentración de PM10). Se ha decidido crear un método sin los datos del fotómetro solar ya que los primeros datos que se tienen de tal instrumento son de finales de septiembre de 2012. Así que si se quisiese crear una climatología a más tiempo, por ejemplo a 10 ó 15 años, no podríamos

disponer de dichos datos y habría que tener en cuenta la fiabilidad de nuestro método sin los datos del CIMEL, pues esta herramienta aporta información de gran relevancia para este estudio. En este método, es necesario que todos los medidores excepto uno superen los umbrales, al igual que en el caso anterior.

El **tercer método** quizás sea el más efectivo. Este método tiene en cuenta todos los medidores, al igual que el primer método. La única diferencia es que en vez de tener en cuenta por separado las dos variables aportadas por el CIMEL (AOD y exponente de Ångström), las interpreta como una sola. Es decir, es necesario que estas dos variables superen sus respectivos umbrales para que podamos tener en cuenta la aportación del CIMEL. En el momento en el que una de estas dos variables no supere el límite, la aportación del fotómetro al método será un 0. Por consiguiente, este método tendrá un máximo de 4 indicadores y es necesario que 3 o todos ellos superen los respectivos umbrales para que consideremos que se trata de un episodio de lluvia de barro. Este método se ha diseñado con la intención de señalar cuándo los aerosoles atmosféricos son realmente de origen mineral o no, ya que para que las lluvias sean de barro es necesario que haya una gran concentración de aerosoles (AOD alto) y que las partículas sean de un grosor suficiente (parámetro de Ångström bajo).

La formulación general de los métodos se puede expresar:

$$I(t) = U_{pcp}(t) \sum_{i=1}^N U_i(t) \quad (2.5)$$

donde $I(t)$ indica el total de las aportaciones de los indicadores para un tiempo t concreto y determina si se trata de una lluvia de barro según cada uno de los métodos explicados anteriormente.

$$U_{pcp}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si precipitaciones} \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (2.6)$$

Es decir, U_{pcp} valdrá 1 y, por lo tanto, se realiza el análisis de los indicadores, cuando se registre precipitación en el Observatorio Meteorológico de AEMET en Murcia en un tiempo t concreto.

Por último, $U_i(t)$ representa cada uno de los indicadores utilizados y tomará los si-

guientes valores:

$$U_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si supera umbral} \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad (2.7)$$

Es decir, valdrá 1 sólo cuando se superen los umbrales establecidos en cada uno de los i indicadores utilizados para un tiempo t concreto. En el caso del método uno, $N = 5$, en el método dos, $N = 3$ y, en el método tres, $N = 4$.

A partir de las tablas creadas y presentadas en el capítulo de *Resultados*, se han realizado unas tablas de contingencia para conocer así los distintos parámetros que estas nos aportan, como son la capacidad de detección y las falsas alarmas de los métodos descritos, entre otros.

PREV \ OBS	SI	NO
	SI	NO
SI	a	b
NO	c	d

Tabla 2.4. Tabla de contingencia de referencia [22].

A continuación se muestran las variables estadísticas obtenidas a partir de estas tablas:

- **% aciertos** es el porcentaje de aciertos de nuestro modelo [22].

$$\%aciertos = \frac{a + d}{n} \cdot 100 \quad (2.8)$$

donde $n = a + b + c + d$.

- **CSI** (*Critical Success Index*) es el Índice Crítico de Aciertos y representa la fracción de observaciones y/o predicciones que se predijeron correctamente [22].

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \cdot 100 \quad (2.9)$$

- **FA** son las Falsas Alarmas y mide la fracción de predicciones que no ocurrieron [22].

$$FA = \frac{b}{a + b} \cdot 100 \quad (2.10)$$

- **PD** es la Probabilidad de Detección y calcula la fracción de eventos observados que fueron previstos [22].

$$PD = \frac{a}{a + c} \cdot 100 \quad (2.11)$$

- **Sesgo** es el error sistemático. Un sesgo superior al 100 % indica una sobrepredicción, mientras que un sesgo inferior al 100 % muestra una subpredicción [22].

$$Sesgo = \frac{a + b}{a + c} \cdot 100 \quad (2.12)$$

- **PSS** (*Peirce Skill Score*) es la diferencia entre la probabilidad de detección y las falsas alarmas. Cuanto mayor sea este valor, mejor será el modelo, ya que indica una capacidad de detección mucho mayor con respecto a las falsas alarmas obtenidas [22].

$$PSS = PD - FA \quad (2.13)$$

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de los datos. En la primera sección se muestra un ejemplo de análisis de un episodio de lluvia de barro observado en febrero de 2017, para ayudar a comprender la metodología explicada en el capítulo anterior. Seguidamente, se presenta una sección de validación en el período de control donde se encuentra la evaluación de los tres modelos propuestos para conocer su capacidad de predicción y falsas alarmas, además del análisis de la capacidad predictiva de las cuatro herramientas utilizadas en este estudio, para conocer así cuál de ellas es más apropiada y entender la diferencia entre los resultados de los tres métodos diseñados. Para finalizar este capítulo, se elabora la climatología de episodios de lluvia de barro en Murcia, indicándose las estaciones y meses en los que se han detectado más episodios, así como el número medio anual de eventos.

3.1. Análisis de un episodio de lluvia de barro

A continuación se mostrará el proceso seguido para el análisis de cada uno de los episodios de lluvia registrados en el Observatorio Meteorológico de AEMET en Murcia para una mejor comprensión de la metodología empleada. Para ello se ha seleccionado el episodio de lluvia de barro producido entre el 21 y 25 de febrero 2017 (episodio observado número 10 del período de control), teniendo lugar las precipitaciones los días 23 y 24 de febrero (recuérdese la definición de episodio de lluvia de barro: desde $(d-2)$ hasta $(d+1)$).



Figura 3.1. Fotografía¹ de Sierra Nevada tras el episodio de invasión de polvo de febrero 2017.

En la *Figura 3.2* se muestran los resultados de cada uno de los indicadores utilizados.

En la *Figura 3.2(a)* aparecen los datos de concentración media diaria de PM10 [8]. Se puede observar un crecimiento notable entre los días 11 y 14 de febrero (correspondiente a otro episodio de lluvia de barro observado) y otro crecimiento de casi todas las estaciones de PM10 entre los días 23 y 25 de febrero correspondiente al episodio que se estudia en la presente sección. La línea horizontal señala los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pues marcan el límite medio en 24h fijado por la directriz de 2005 de la OMS (Organización Mundial de la Salud) [19].

En las *Figuras 3.2(b)* y *3.2(c)* se muestran los datos de AOD y el parámetro de Ångström aportados por el fotómetro solar CIMEL [15], respectivamente. La gráfica correspondiente a los datos de AOD muestra un crecimiento abrupto entre los días 22 y 24 de febrero y, a su vez, la correspondiente a los datos del exponente de Ångström muestra un decrecimiento tales días, lo que indica que la presencia de aerosoles es superior a la normal y que además, estos tienen un tamaño superior a lo habitual. Al igual que en la *Figura 3.2(a)*, también aparece un comportamiento anómalo de los valores de AOD y del exponente de Ångström alrededor del 12 de febrero, correspondiente al primer evento ocurrido este mismo mes.

En cuanto a las imágenes de satélite que se muestran en las *Figuras 3.2(d)* y *3.2(e)*, se puede apreciar fácilmente el alto valor de AOD en el caso de los satélites Terra y Aqua [16] o la presencia de aerosoles minerales del producto *dust* del satélite MSG [23] en los días previos a la lluvia de barro observada.

¹Imagen de Twitter Objetivo Tormenta.

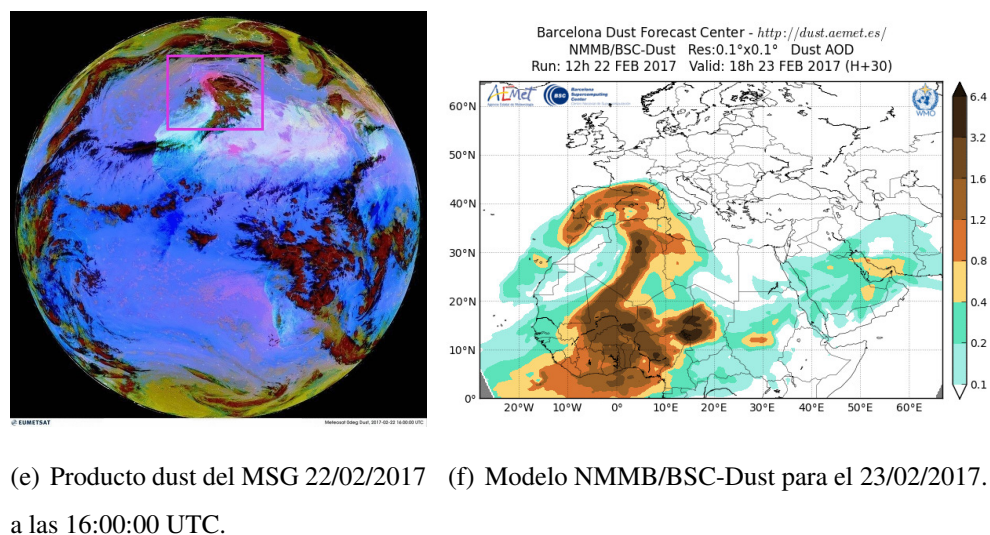
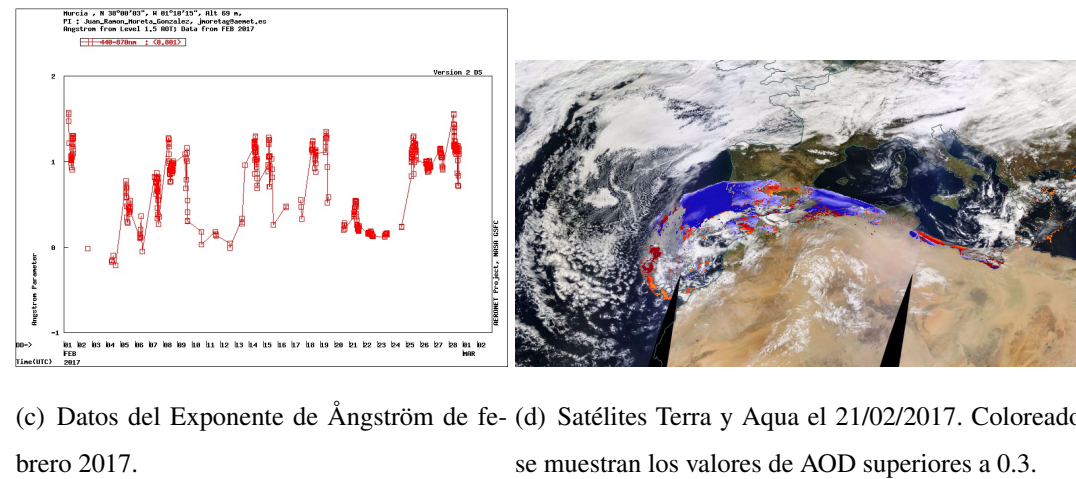
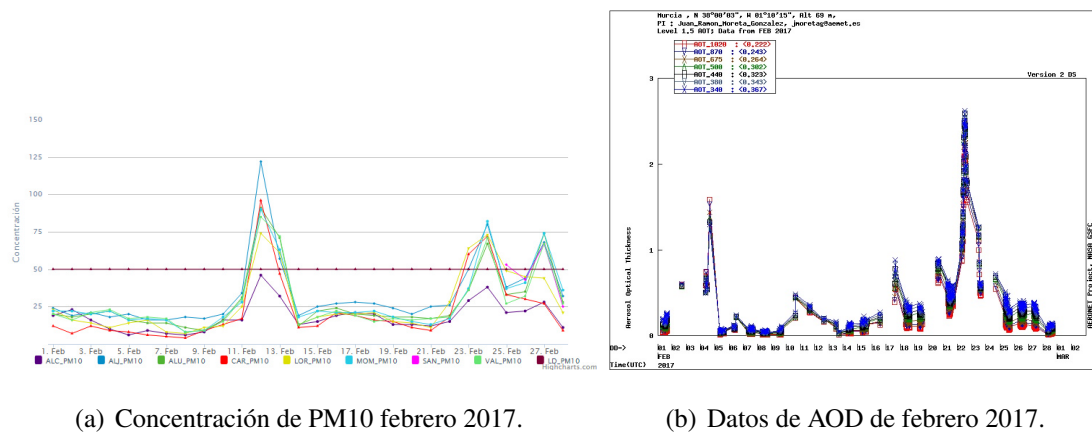


Figura 3.2. Imágenes de los datos aportados por cada uno de los indicadores durante el episodio del 21 al 25 de febrero 2017 con observación de lluvia de barro los días 23 y 24.

La última de las imágenes de la *Figura 3.2* muestra el modelo de predicción de polvo del BSC [4] donde se observa la invasión de polvo africano en la mayor parte de la Península Ibérica, llegando incluso a Francia e Italia los días posteriores.

Para acabar esta sección, en la *Figura 3.3* se muestran los mapas de las situaciones sinópticas de los días de la precipitación, así como del previo a tal evento. En ella se puede observar una de las dos configuraciones descritas anteriormente. El día previo a la lluvia (22 de febrero) aparece un centro de bajas presiones en el suroeste de la Península Ibérica, sobre las costas atlánticas de Marruecos, induciendo vientos de sur/sureste, en niveles medios y bajos, sobre la Región de Murcia. Al día siguiente, primer día de precipitación, el centro de bajas presiones se desplaza hacia el este, situándose al sur de la Península, exactamente sobre el Estrecho de Gibraltar, lo que produce vientos de sureste sobre Murcia (niveles medios y bajos). Finalmente, el 24 de febrero, la vaguada se desplaza hacia el este, alcanzando las Islas Baleares e introduciendo el polvo africano en Italia.

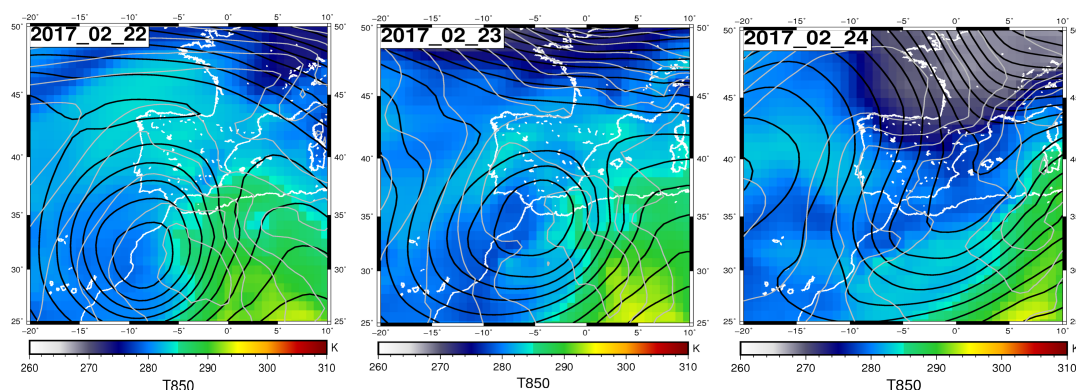


Figura 3.3. Mapas de las situaciones sinópticas del evento de febrero 2017. En negro se presentan las isohipsas a 500 hPa, en gris, la presión reducida a nivel del mar y, en colores, la temperatura a 850 hPa [11]. Se observa una borrasca sobre las costas atlánticas de Marruecos que induce vientos de componente sur en niveles medios y bajos sobre la Península y se desplaza hacia el este en los días posteriores.

Este evento tuvo una gran repercusión social, como se ha mostrado en la imagen de la *Figura 3.1*, apareciendo como noticia en numerosos medios de comunicación.

Este evento analizado es un buen ejemplo de lluvia de barro en el que todos los indicadores superaron los umbrales establecidos. Este es el procedimiento seguido para cada uno de los episodios de lluvia de barro observados, así como para los días en los que se registró precipitación en el Observatorio Meteorológico de Murcia desde enero de 2013

hasta mayo de 2017. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no siempre todos los indicadores superan los umbrales. Por lo que se ha considerado que, al menos, $n - 1$ de los indicadores utilizados deben superar dichos límites (siendo n el total de indicadores).

3.2. Validación en el período de control

En esta sección se presentan los métodos aplicados a los datos correspondientes al período de control, utilizados para evaluar la calidad de los métodos propuestos y capacidad predictiva de cada uno de los indicadores.

3.2.1. Evaluación de los modelos

En la *Tabla 3.1* aparecen los métodos discretos aplicados a los datos de la *Tabla 2.2*. Mientras que en la *Tabla 3.2* aparecen los métodos aplicados a los datos de la *Tabla 2.3*. Indicando 1 cuando se han superado los umbrales establecidos y 0 en caso contrario.

Episodio	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1	4	2	3
3	1	1	1	1	0	1	4	2	3
4	1	1	1	1	1	1	5	3	4
5	1	1	1	0	1	1	4	2	3
6	1	1	1	1	1	1	5	3	4
7	1	1	1	1	0	1	4	2	3
8	1	1	1	1	1	1	5	3	4
9	1	1	1	1	1	1	5	3	4
10	1	1	1	1	1	1	5	3	4
11	0	1	1	1	0	0	3	2	2
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.1. Métodos discretos aplicados a los episodios observados en el período de control (utilizando los datos de la *Tabla 2.2*). Se indica 1 cuando se superan los umbrales establecidos y 0 en caso contrario.

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
7-12/05/2016	0	1	0	0	0	0	0	0	0
28/05/2016	0	1	0	1	1	0	3	2	2
04/06/2016	0	0	0	1	0	0	1	1	1
10/08/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/08/2016	0	0	0	1	0	0	1	1	1
13/09/2016	0	0	0	1	0	0	1	1	1
20/09/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28-29/09/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09/10/2016	1	0	0	1	0	0	2	1	1
12-14/10/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-20/10/2016	0	1	0	1	0	0	2	1	1
28/10/2016	0	0	1	1	0	0	2	2	2
2-6/11/2016	1	1	1	1	1	1	5	3	4
20-23/11/2016	0	0	0	1	0	0	1	1	1
27/11/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/11-6/12/2016	0	1	0	0	0	0	1	0	0
8-9/12/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-19/12/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-21/01/2017	0	1	0	0	0	0	1	0	0
02/02/2017	0	1	0	0	0	0	1	0	0
18-19/02/2017	0	0	0	1	0	0	1	1	1
12-14/03/2017	0	1	1	1	0	0	3	2	2
25/04/2017	1	1	1	1	1	1	5	3	4
27-29/04/2017	0	0	0	1	1	0	2	2	2

Tabla 3.2. Métodos discretos aplicados a los días de precipitación sin barro observado en el período de control (utilizando los datos de la *Tabla 2.3*). Se indica 1 cuando se superan los umbrales establecidos y 0 en caso contrario.

En las columnas finales aparecen los totales de la suma de los datos aportados por los indicadores. En azul (TOT1) aparece el resultado del primer método empleado, donde se han tenido en cuenta todos los detectores. En naranja (TOT2) aparece el resultado del método 2, en el cual no se han tenido en cuenta los datos aportados por el fotómetro solar. En la última columna y en verde (TOT3) aparece el resultado del método 3 en el cual se han tenido en cuenta los datos del modelo del BSC, satélites, PM10 y CIMEL (AOD y α como un único indicador).

Las celdas que aparecen sombreadas corresponden a los episodios de lluvia de barro detectados por cada uno de los métodos diseñados. En la *Tabla 3.1* se observa que los métodos 1 y 3, detectan 9 de los 12 eventos observados. Sin embargo, el método 2 detecta 10 episodios de lluvia de barro. En cuanto a la *Tabla 3.2*, los métodos 1 y 3 predicen 2 eventos, mientras que el método 2 predice 6 eventos, de un total de 24 episodios de precipitación registrados, pero sin observación de lluvia de barro. En este período de control coincide el número de eventos detectados por los métodos 1 y 3, aunque no en todas las ocasiones se aprecia tal comportamiento, como se muestra en las tablas presentadas en el *Apéndice C*, que corresponden a los datos analizados desde 2013 hasta 2017.

En la presente sección también se presentan las tablas de contingencia introducidas en el capítulo de *Metodología*, que han sido utilizadas para analizar la relación entre el número de eventos observados (OBS) y los previstos (PREV) por cada uno de los tres métodos. Como se ha indicado anteriormente, los métodos 1 y 3 predicen el mismo número de eventos, por lo que las tablas de contingencia correspondientes a tales métodos serán iguales y se presentan en la *Tabla 3.3*. La *Tabla 3.4* corresponde a la tabla de contingencia del método 2.

PREV \ OBS	OBS	
	SI	NO
SI	9	2
NO	3	22

Tabla 3.3. Tabla de contingencia para los métodos 1 y 3.

PREV \ OBS	OBS	
	SI	NO
SI	10	6
NO	2	18

Tabla 3.4. Tabla de contingencia para el método 2.

A continuación, en la *Tabla 3.5*, se presentan las variables obtenidas a partir de las tablas de contingencia anteriores, expresadas en tanto por ciento.

Método	% Aciertos	CSI	PD	FA	Sesgo	PSS
1	86	64	75	18	92	57
2	78	56	83	38	133	45
3	86	64	75	18	92	57

Tabla 3.5. Resultados de las tablas de contingencia para los métodos de predicción diseñados, expresados en tanto por ciento.

Estos resultados muestran que los métodos 1 y 3 son mejores ya que, aunque el sesgo nos indique una subpredicción, esta es mucho menor que la sobrepredicción del método 2. Además, el PSS muestra la fiabilidad del método y, en el caso de los métodos 1 y 3, este es mayor, lo que sugiere una mayor probabilidad de detección con respecto a las falsas alarmas, como se puede apreciar en la *Figura 3.4*.

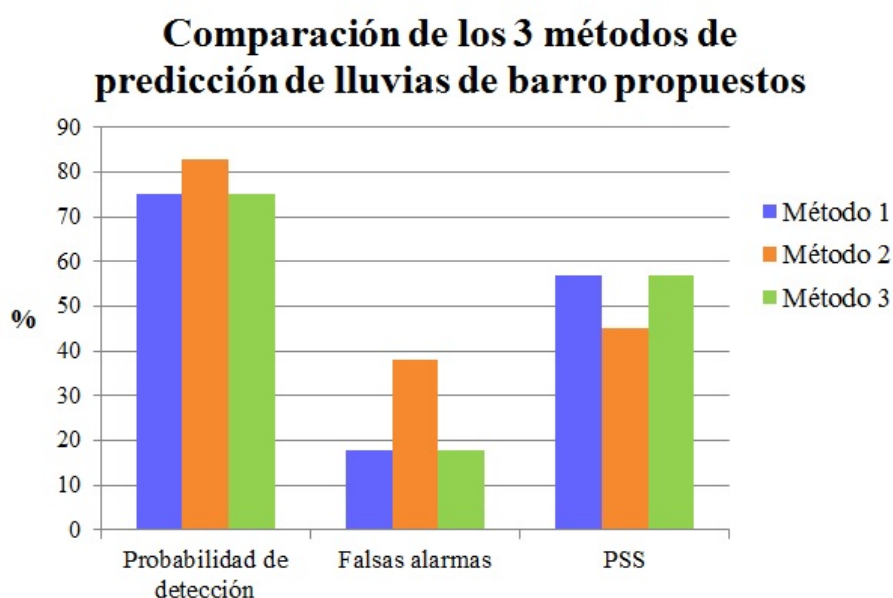


Figura 3.4. Histograma resumen para comparar los 3 métodos utilizados. Aunque la probabilidad de detección del método 2 sea mayor, también son mayores sus falsas alarmas, produciendo un PSS menor, lo que indica que es preferible elegir los métodos 1 ó 3 siempre que sea posible.

3.2.2. Análisis de la capacidad predictiva de los indicadores

En las *Tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9* se presentan las tablas de contingencia utilizadas para conocer cuál es la mejor herramienta de detección de lluvia de barro y, en la *Tabla 3.10*, las correspondientes variables obtenidas a partir de estas tablas, expresadas en tanto por ciento.

PREV \ OBS	SI	NO
SI	9	2
NO	3	22

Tabla 3.6. Tabla de contingencia para el fotómetro solar CIMEL.

PREV \ OBS	SI	NO
SI	11	4
NO	1	20

Tabla 3.7. Tabla de contingencia para el modelo NMMB/BSC-Dust.

PREV \ OBS	SI	NO
SI	9	13
NO	3	11

Tabla 3.8. Tabla de contingencia para los satélites.

PREV \ OBS	SI	NO
SI	6	4
NO	6	20

Tabla 3.9. Tabla de contingencia para la concentración de PM10.

Indicador	% Aciertos	CSI	PD	FA	Sesgo	PSS
CIMEL	86	64	75	9	92	66
BSC	86	69	92	27	125	65
SAT	56	36	75	59	183	16
PM10	72	38	50	40	83	10

Tabla 3.10. Resultados de las tablas de contingencia para los indicadores utilizados.

Como se puede apreciar en el histograma de la *Figura 3.5*, que resume los resultados de las tablas de contingencia anteriores, las mejores herramientas de detección de lluvias de barro son el fotómetro solar CIMEL y el modelo del BSC, pues tienen un PSS mucho mayor al de los otros dos (satélites y concentración de PM10), lo que indica que su capacidad de detección es mucho mayor que las otras respecto al número de falsas alarmas. Estos resultados explican porqué el segundo método de predicción diseñado en este trabajo muestra los peores resultados, ya que el fotómetro solar es una pieza clave para una buena identificación de los episodios.

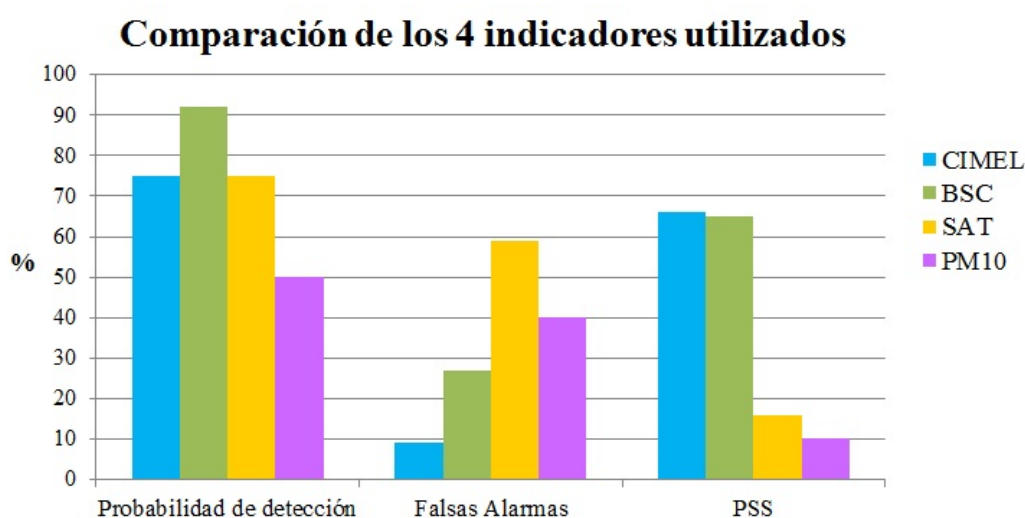


Figura 3.5. Histograma que compara los 4 indicadores utilizados en este estudio. Se observa que las mejores herramientas de detección son el fotómetro solar CIMEL y el modelo de predicción de polvo del BSC, pues ambos muestran un PSS mucho mayor al resto. La probabilidad de detección de ambos es mayor que a la de los otros dos instrumentos y, además, el porcentaje de falsas alarmas es muy bajo.

3.3. Elaboración de la climatología

En esta sección se presenta la climatología creada. Permitirá conocer las estaciones y meses en los que se han detectado más episodios de lluvia de barro, así como el porcentaje de episodios detectados por cada método y el número medio anual de eventos.

En la *Tabla 3.11* se muestran los porcentajes de eventos de lluvia de barro de cada mes respecto al total de estos eventos, detectados por cada uno de los 3 métodos propuestos, desde el 1 de mayo de 2013 hasta el 30 de abril de 2017, para completar así 4 años y no

tener más datos de unos meses que de otros como pasaría si escogiésemos todo el período estudiado (enero 2013 - junio 2017).

Método	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	0	15	0	23	4	12	15	19	0	4	8	0
2	0	8	8	17	10	10	10	12	10	10	6	2
3	0	14	0	25	4	11	14	18	0	7	7	0

Tabla 3.11. Porcentajes de eventos de lluvias de barro de cada mes respecto al total de eventos detectados por cada uno de los métodos, desde el 1 de mayo de 2013 hasta el 30 de abril de 2017 (4 años completos).

En este período de estudio, el método 1 es capaz de detectar 26 eventos, el método 2 predice 52, mientras que el método 3 localiza 28 episodios de lluvia de barro en Murcia.

En la *Figura 3.6* se exponen los resultados de la *Tabla 3.11* en forma de histograma. En él se puede observar que el mes de abril registra el mayor porcentaje de episodios de lluvia de barro, siendo la primavera y el verano las estaciones más propensas para que ocurran estas precipitaciones. Esto puede deberse a que la masa de aire sahariana tiende a invadir el sur de la Península Ibérica en las estaciones más cálidas, lo que aumenta las probabilidades de episodios de lluvia de barro en la región de estudio. Por otro lado, el invierno es la estación con el menor número de eventos detectado por los métodos.

Como se puede observar en los histogramas de la presente sección, los métodos 1 y 3 guardan una analogía en todos ellos. Efectivamente, el fotómetro solar es una pieza muy importante a la hora de detectar eventos de lluvia de barro. Sin embargo, sólo se dispone de datos desde septiembre de 2012, lo que limita mucho la creación de una climatología a más años que la que se presenta en este estudio. Por lo tanto, habría que adaptarse al método de detección 2, aún sabiendo que supone una sobrepredicción de episodios.

A continuación, en la *Figura 3.7*, se muestra el porcentaje de eventos de barro detectados por cada uno de los 3 métodos respecto al total de eventos de precipitación (182) registrados en el Observatorio Meteorológico de AEMET en Murcia desde el 1 de enero de 2013 hasta el 3 de junio de 2017.

Al igual que se había definido con anterioridad, un episodio de precipitación es un período de varios días consecutivos en los que se registra precipitación.

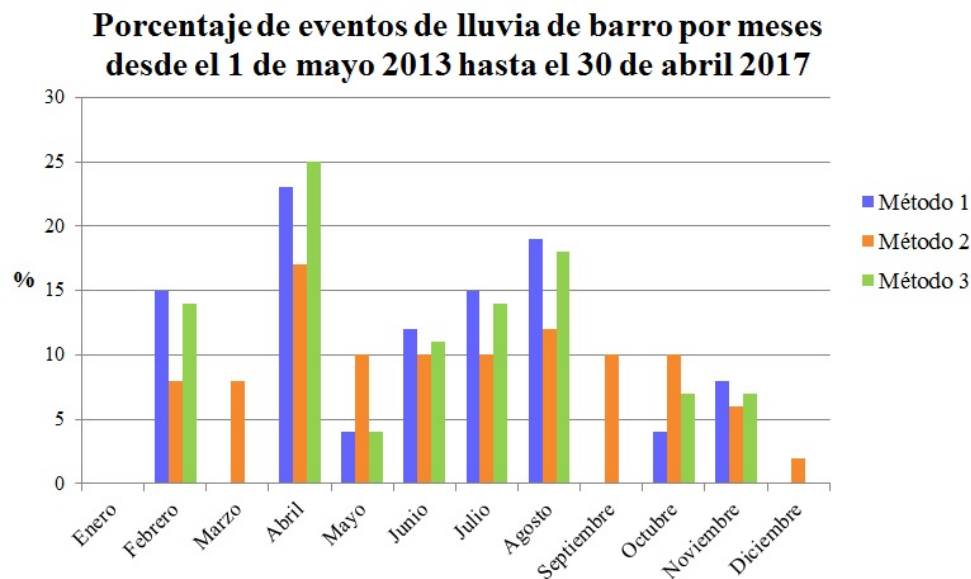


Figura 3.6. Histograma resumen para conocer el porcentaje mensual de episodios de lluvia de barro en Murcia respecto al número total de eventos detectados por cada uno de los 3 métodos, desde el 1 de mayo 2013 hasta el 30 de abril 2017. Se muestra que en el mes de abril se ha detectado un número de episodios mucho mayor al resto, así como que la primavera y el verano son las estaciones que registran más eventos.

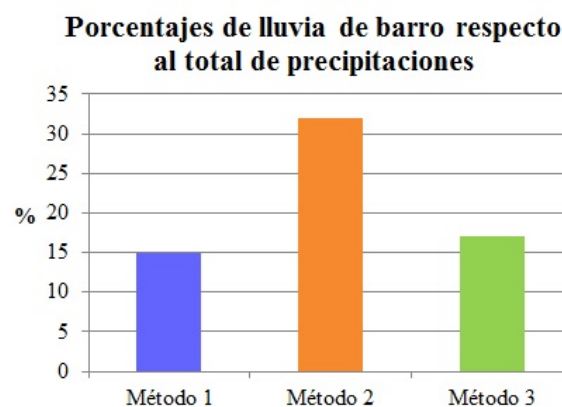


Figura 3.7. Histograma que muestra el porcentaje de eventos de lluvia de barro sobre el total de episodios de precipitación registrados en el Observatorio Meteorológico de AEMET en Murcia, desde el 1 de enero 2013 hasta el 3 junio 2017.

El método 1 predice que el 15 % del total de los episodios de precipitación ocurridos en el período estudiado fueron lluvias de barro, el método 2 predice un 32 % y, por último, el método 3 predice un 17 % de eventos de lluvia de barro en Murcia.

En esta misma sección se muestra el número anual de eventos detectados por cada uno de los métodos, así como el número medio anual de los mismos y la desviación estándar

correspondiente a cada uno. Estos resultados se pueden consultar en la *Tabla 3.12* y en el histograma de la *Figura 3.8*.

Método	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	Media anual	σ
1	4	6	5	11	6,5	3,1
2	11	16	9	16	13,0	3,6
3	5	6	6	11	7,0	2,7

Tabla 3.12. Número anual de eventos y media anual de episodios de lluvia de barro detectados por cada uno de los tres métodos, junto con la desviación estándar σ . Se define un año desde el 1 de mayo del primer año hasta el 30 de abril del segundo año.

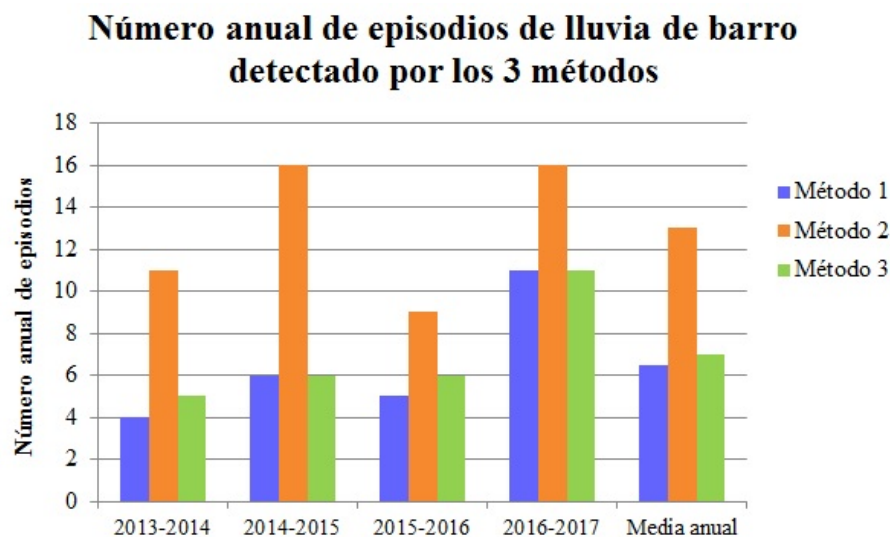


Figura 3.8. Histograma que muestra el número anual de eventos de lluvia de barro detectado por cada método. En las últimas columnas de la derecha se muestra la media anual de episodios. Se define un año desde el 1 de mayo del primer año hasta el 30 de abril del segundo año.

Por lo tanto, el número medio anual de episodios varía entre 6,5 y 13, dependiendo del método que se utilice para el estudio:

- **Método 1:** $6,5 \pm 3,1$ episodios de lluvia de barro.
- **Método 2:** $13,0 \pm 3,6$ episodios de lluvia de barro.
- **Método 3:** $7,0 \pm 2,7$ episodios de lluvia de barro.

Una vez más, los métodos 1 y 3 muestran resultados muy similares, siendo el método 2 el que más difiere debido a la ausencia de datos del fotómetro solar CIMEL.

Capítulo 4

Conclusiones

Como respuesta al problema inicialmente planteado por un usuario de AEMET, se ha construido esta climatología que ha llevado a la creación de unos métodos de detección de eventos de lluvia de barro que podría ser utilizado en cualquier punto del planeta, mientras se disponga de las herramientas necesarias.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, teniendo en cuenta la incertidumbre de la que se partía al no basarse en ningún método de este tipo aplicado con anterioridad en otros estudios similares. La capacidad de detección de los métodos diseñados es bastante alta, aunque en el segundo método cabe destacar el alto porcentaje de falsas alarmas que se obtiene, lo que invita a abandonarlo siempre que se disponga del fotómetro solar. Entre los métodos 1 y 3, se opta por el segundo, pues utiliza las dos variables aportadas por el fotómetro como un solo indicador ya que es necesario que haya mucha concentración de aerosoles y que además estos sean de un tamaño considerable, para asegurar así que se trata de aerosoles minerales. Como se puede observar en los resultados obtenidos, no todas las herramientas aportan la misma información ni esta es de la misma calidad. El fotómetro solar CIMEL y el modelo de predicción de polvo del BSC son los indicadores más fiables, aunque el fotómetro sea de reciente instalación, lo que limita su utilización en este estudio.

Cabe destacar que el mayor porcentaje de lluvias de barro acontecidas en Murcia durante el período estudiado tienen lugar en primavera y verano, pues la masa de aire africano tiene más tendencia a invadir el sur peninsular.

Al calcularse el número medio anual de eventos, se podrá prestar el servicio que el usuario de AEMET necesitaba, ya que la entidad aseguradora podrá establecer sus precios respecto a las pérdidas esperadas.

Utilizando todos los indicadores de este estudio, la climatología no podría extenderse más allá de septiembre de 2012, ya que no se dispone del fotómetro solar CIMEL con anterioridad. Así que, para crear una climatología a más años, debería emplearse únicamente el método de detección 2, pese al alto número de falsas alarmas que aporta. Teniendo en cuenta las fechas de instalación de cada una de las herramientas utilizadas, podría extenderse la climatología hasta 2001. Sin embargo, se aconseja realizar tal climatología hasta 2006, pues 5 estaciones de PM10 ya estaban instaladas en la Región, los satélites Terra y Aqua estaban en órbita y el modelo del BSC ya había sido mejorado. Una climatología de 10 años ayudaría a una mejor comprensión del comportamiento de estos eventos. Extendiéndolo a más años se correría el riesgo de tener pocos registros, además de una mala calidad de los mismos.

Si se quisiese continuar este estudio, debería diseñarse un *script* que identificase los episodios, utilizando los métodos discretos desarrollados en este trabajo, de manera automática. Para ello se introducirían los datos en bruto para que el programa los leyese y, posteriormente, asignase un 1 (ó 0) en el caso de que los datos superasen (o no) los umbrales establecidos, ahorrando tiempo a la investigación.

Este estudio inicial introduce la idea para otros investigadores que podrían utilizar estas herramientas para la detección de aerosoles minerales, pues al cruzar los datos aportados por estos y los datos de precipitación se podrían identificar los episodios de lluvia de barro fácilmente. También podrían utilizarse otros instrumentos de medida y predicción al igual que se ha hecho con los propuestos en este trabajo. Únicamente habría que establecer unos nuevos umbrales, o mejorar los presentes, para obtener una mayor precisión en la detección de estos eventos.

Capítulo 5

Referencias bibliográficas

- [1] Aerosol Robotic Network (AERONET) (s.f.). Aerosol Optical Depth. NASA. Recuperado de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Aerosol_Optical_Depth.pdf
- [2] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (s.f.). Vigilancia nacional del medio ambiente atmosférico. Gobierno de España. Recuperado de http://www.aemet.es/es/idi/medio_ambiente/vigilancia
- [3] Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage Learning.
- [4] Barcelona Dust Forecast Center. AEMET (s.f.). The NMMB/BSC-Dust model. Gobierno de España. Recuperado de: <https://dust.aemet.es/methods/the-nmm-b-bsc-dust-model>
- [5] Boucher, O. (2015). *Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts*. Springer.
- [6] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) (s.f.). Modelización de la contaminación atmosférica. Ministerio de Economía y Competitividad. Gobierno de España. Recuperado de <http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do?TR=C&IDR=169>
- [7] Chaâbane, M., Azri, C., & Medhioub, K. (2012). Climatological Aspects of Aerosol Physical Characteristics in Tunisia Deduced from Sun Photometric Measurements. *The Scientific World Journal*, 2012.

- [8] Dirección General de Medio Ambiente Consejería de Turismo, Cultura y Medio Ambiente. (s.f.). Calidad del Aire. Región de Murcia. Recuperado de <http://sinclair.carm.es/calidadaire/redvigilancia/redvigilancia.aspx>
- [9] EUMETSAT (s.f.). Monitoring weather and climate from space. Recuperado de: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/index.html>
- [10] EUMETSAT (s.f.). Product generation description. Recuperado de: http://oiswww.eumetsat.int/ids/html/product_description.html
- [11] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (s.f.). Mapas de las situaciones sinópticas. Recuperado de: <https://www.ecmwf.int/>
- [12] Fiol, L. A., Fornós, J. J., Gelabert, B., & Guijarro, J. A. (2005). Dust rains in Mallorca (Western Mediterranean): Their occurrence and role in some recent geological processes. *Catena*, 63(1), 64-84.
- [13] Frazier, S. (s.f.). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). NASA. Recuperado de: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- [14] Gobierno de Aragón (s.f.). La calidad del aire en Aragón. Recuperado de www.aragonaire.es
- [15] Holben, B. N. (s.f.). Aerosol Robotic Network (AERONET). NASA. Recuperado de <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- [16] National Aeronautics and Space Administration (NASA) (s.f.). EOSDIS Worldview. Recuperado de: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>
- [17] National Aeronautics and Space Administration (NASA) (s.f.). MODIS Atmosphere. Recuperado de https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/
- [18] Nickovic, S., Kallos, G., Papadopoulos, A., & Kakaliagou, O. (2001). A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 18113-18129.
- [19] Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheet>

s/fs313/es/

[20] Pérez, C., Haustein, K., Janjic, Z., Jorba, O., Huneus, N., Baldasano, J. M., ... & Perlwitz, J. P. (2011). Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model—Part 1: Model description, annual simulations and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 13001-13027.

[21] Quereda Sala, J., & Olcina Cantos, J. (1994). Lluvias de barro en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. *Investigaciones geográficas*, nº 12, 1994; pp. 7-22.

[22] Wilson, L. & Nurmi, P. (s.f.). Forecast Verification Module. EUMETCAL. Recuperado de <http://www.met-learning.eu>

[23] World Meteorological Organization (WMO) (s.f.). Northern Africa-Middle East-Europe Regional Center. Recuperado de: <https://sds-was.aemet.es/forecast-products/dust-observations/msg-2013-eumetsat>

Apéndice A

Espesor Óptico de Aerosoles

A continuación se muestra el desarrollo seguido hasta llegar a la definición de AOD.

El coeficiente de extinción viene dado por [5]:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs} \quad (A.1)$$

donde σ_{sca} y σ_{abs} son los coeficientes de dispersión y de absorción respectivamente [5]:

$$\sigma_{sca} = \int_0^\infty \pi r^2 Q_{sca}(r) n(r) dr \quad (A.2)$$

$$\sigma_{abs} = \int_0^\infty \pi r^2 Q_{abs}(r) n(r) dr \quad (A.3)$$

donde Q_{sca} y Q_{abs} son los factores de dispersión y de absorción, definidos como el ratio de las secciones eficaces de dispersión y de absorción y la sección eficaz geométrica s_g de la partícula ($s_g = \pi r^2$ para una partícula esférica de radio r) [5]:

$$Q_{sca} = \frac{s_{sca}}{s_g}; \quad Q_{abs} = \frac{s_{abs}}{s_g} \quad (A.4)$$

Los coeficientes de dispersión, absorción y extinción son propiedades locales de la atmósfera, es decir, varían con la ubicación y la altitud. La integral del coeficiente de extinción sobre la vertical se denomina **Espesor Óptico de Aerosoles** (AOD o AOT, por sus siglas en inglés) [5]:

$$\tau = \int_{superficie}^{parte alta atmosfera} \sigma_{ext}(z) dz \quad (A.5)$$

Las propiedades ópticas de los aerosoles dependen de la longitud de onda de la radiación. Así que es importante especificar la longitud de onda que se está tratando al hablar de AOD ya que las diferencias pueden ser significativas.

Apéndice B

Parámetro de Ångström

El coeficiente de Ångström, parámetro de Ångström o exponente de Ångström mide la dependencia espectral del espesor óptico de aerosoles (o coeficiente de extinción) y viene dado por la siguiente expresión [5]:

$$\alpha = -\frac{\ln(\tau_1/\tau_2)}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (\text{B.1})$$

donde τ_1 y τ_2 son los AOD en las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente. El parámetro de Ångström varía con la elección de estas dos longitudes de onda. Sin embargo, la variación es relativamente pequeña en el espectro visible [5].

El coeficiente de Ångström nos da información sobre el tamaño de la partícula dispersora. Los valores de α próximos a cero, incluso valores negativos, son propios de los aerosoles; mientras que valores más altos corresponden a moléculas o acumulación de partículas [5].

Apéndice C

Tablas de datos

En este último apéndice se muestran las tablas de datos de todo el período de estudio (enero de 2013 - junio 2017). Con ellos se han realizado todos los cálculos y diagramas que se presentan en el capítulo de *Resultados*. Primero se presentan los datos de 2017, finalizando con los correspondientes a 2013.

C.1. Datos de 2017

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
05/05/2017	0,349	0,524	3	SI	NO
03/06/2017	0,346	0,649	3	SI (NASA)	NO

Tabla C.1. Tabla de datos de 2017 (fuera del período de control).

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
05/05/2017	1	1	1	1	0	1	4	2	3
03/06/2017	1	1	1	1	0	1	4	2	3

Tabla C.2. Métodos discretos aplicados a los datos de la *Tabla C.1*.

C.2. Datos de 2016

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
05/01/2016	0,022	0,910	0	NO	NO
15/01/2016	0,062	1,871	0	NO	NO
20/01/2016	0,099	1,382	0	NO	NO
30/01/2016	0,221	1,471	0	SI (NASA)	NO
04/02/2016	0,056	1,100	0	NO	NO
07/02/2016	0,093	0,249	0	NO	NO
14/02/2016	0,024	0,458	0	NO	NO
19-20/02/2016	0,072	0,445	2	NO	NO
07/03/2016	0,043	1,022	0	NO	NO
20-22/03/2016	0,114	1,483	0	NO	NO
04-06/04/2016	0,486	0,255	3	SI (NASA)	NO
23/04/2016	0,042	0,935	0	NO	NO
29/04/2016	0,405	0,966	0	NO	NO

Tabla C.3. Tabla de datos de 2016 (fuera del período de control).

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
05/01/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/01/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/01/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/01/2016	0	0	0	1	0	0	2	1	1
04/02/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07/02/2016	0	1	0	0	0	0	1	0	0
14/02/2016	0	1	0	0	0	0	1	0	0
19-20/02/2016	0	1	1	0	0	0	3	1	1
07/03/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-22/03/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04-06/04/2016	1	1	1	1	0	1	6	2	3
23/04/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/04/2016	1	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla C.4. Métodos discretos aplicados a los datos de la Tabla C.3.

C.3. Datos de 2015

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
16/01/2015	0,123	0,857	0	NO	NO
18-19/01/2015	0,069	1,228	0	NO	NO
21/01/2015	0,059	1,878	0	NO	NO
31/01/2015	0,028	0,977	0	NO	NO
04/02/2015	0,040	1,686	0	NO	NO
09-12/02/2015	0,316	0,258	1	SI (NASA)	NO
15/02/2015	0,022	1,154	0	NO	NO
17-19/02/2015	0,199	1,234	0	NO	NO
21/02/2015	0,047	1,903	0	NO	NO
14/03/2015	0,115	1,370	0	SI (NASA)	NO
17-25/03/2015	0,272	1,060	3	SI	NO

07-09/04/2015	0,401	0,202	4	SI (NASA)	NO
11-12/04/2015	0,411	0,451	3	SI (NASA)	NO
15-16/04/2015	0,131	1,240	3	SI (NASA)	SI
22/04/2015	0,281	0,529	3	SI (NASA)	NO
26/04/2015	0,258	1,098	0	SI (NASA)	NO
19-20/05/2015	0,388	0,493	3	SI (NASA)	NO
30/05/2015	0,194	1,432	2	SI (NASA)	NO
11/06/2015	0,385	1,431	2	SI (NASA)	NO
13/06/2015	0,159	1,093	1	NO	NO
15/06/2015	0,160	1,250	0	NO	NO
23/06/2015	0,139	1,210	0	SI (NASA)	NO
22/07/2015	0,262	1,115	2	SI (NASA)	NO
30-31/07/2015	0,380	0,539	2	SI (NASA)	NO
09-10/08/2015	0,429	0,391	2	SI (NASA)	SI
16/08/2015	0,153	1,123	0	NO	NO
31/08/2015	0,946	0,262	1	SI	SI
05-07/09/2015	0,266	1,159	0	SI (NASA)	NO
12/09/2015	0,492	1,364	2	NO ¹	NO
26-27/09/2015	0,278	0,959	0	SI (NASA)	NO
05/10/2015	0,177	0,93	1	SI (NASA)	SI
14/10/2015	0,100	1,468	0	NO	NO
17-21/10/2015	0,117	0,903	0	SI (NASA)	NO
24-25/10/2015	0,096	1,487	0	NO ¹	NO
01-02/11/2015	0,083	1,208	0	NO ¹	NO
21/11/2015	0,048	0,788	0	NO	NO
10/12/2015	0,248	1,165	0	NO	NO
29/12/2015	0,204	0,563	1	NO	NO

Tabla C.5. Tabla de datos de 2015.

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
16/01/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-19/01/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/01/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/01/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04/02/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09-12/02/2015	1	1	1	1	0	1	4	2	3
15/02/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17-19/02/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/02/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/03/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
17-25/03/2015	0	0	1	1	0	0	2	2	2
07-09/04/2015	1	1	1	1	0	1	4	2	3
11-12/04/2015	1	1	1	1	0	1	4	2	3
15-16/04/2015	1	1	1	1	1	1	5	3	4
22/04/2015	0	1	1	1	0	0	3	2	2
26/04/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
19-20/05/2015	1	1	1	1	0	1	4	2	3
30/05/2015	0	0	1	1	0	0	2	2	2
11/06/2015	1	0	1	1	0	0	3	2	2
13/06/2015	0	0	1	0	0	0	1	1	1
15/06/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/06/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
22/07/2015	0	0	1	1	0	0	2	2	2
30-31/07/2015	1	1	1	1	0	1	4	2	3
09-10/08/2015	1	1	1	1	1	1	5	3	4
16/08/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/08/2015	1	1	1	1	1	1	5	3	4
05-07/09/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
12/09/2015	1	0	1	0	0	0	2	1	1
26-27/09/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
05/10/2015	0	0	1	1	1	0	3	3	3

14/10/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17-21/10/2015	0	0	0	1	0	0	1	1	1
24-25/10/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01-02/11/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/11/2015	0	1	0	0	0	0	1	0	0
10/12/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/12/2015	0	1	1	0	0	0	2	1	1

Tabla C.6. Métodos discretos aplicados a los datos de la *Tabla C.5*.

C.4. Datos de 2014

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
01-02/01/2014	0,030	1,437	0	NO	NO
11/01/2014	0,160	1,038	1	NO ¹	NO
13/01/2014	0,114	1,191	2	NO ¹	NO
16/01/2014	0,050	0,964	0	NO ¹	NO
18-19/01/2014	0,077	1,583	0	NO ¹	NO
22/01/2014	0,049	1,934	0	NO ¹	NO
29/01/2014	0,031	1,045	0	NO ¹	NO
03-05/02/2014	0,119	0,77	0	NO ¹	SI
09-11/02/2014	0,021	0,936	0	SI (NASA)	NO
17-18/02/2014	0,238	0,235	6	SI (NASA)	SI
24/02/2014	0,141	1,104	0	NO	NO
27/02/2014	0,095	0,651	0	NO	NO
01/03/2014	0,052	1,444	0	NO ¹	NO
13/03/2014	0,194	1,54	1	NO	NO
22/03/2014	0,230	1,378	0	SI (NASA)	SI
25/03/2014	0,081	1,065	0	NO	SI

¹No se pudo realizar medida por presencia de nubes.

02-03/04/2014	0,037	1,290	2	SI (NASA)	SI
11-12/04/2014	0,231	0,372	3	SI (NASA)	SI
18-21/04/2014	0,183	1,086	0	SI (NASA)	NO
24/04/2014	0,136	1,267	0	NO	NO
09/05/2014	0,209	0,803	1	SI (NASA)	NO
28/05/2014	0,071	1,172	0	SI (NASA)	NO
31/05-01/06/2014	0,114	1,088	0	NO ¹	NO
16-17/06/2014	0,297	1,459	0	SI (NASA)	NO
22-24/06/2014	0,216	0,747	2	SI (NASA)	NO
17/08/2014	0,123	1,048	0	NO	NO
16/09/2014	0,192	0,457	1	SI (NASA)	NO
21-22/09/2014	0,167	0,666	1	SI (NASA)	NO
24/09/2014	0,175	1,600	0	NO	NO
26-27/09/2014	0,387	1,469	0	SI (NASA)	NO
29-30/09/2014	0,218	0,930	1	SI (NASA)	NO
02/10/2014	0,218	0,616	2	SI (NASA)	NO
04-05/10/2014	0,373	1,193	1	SI (NASA)	NO
11-12/10/2014	0,067	0,595	0	NO ¹	NO
14/10/2014	0,071	0,590	0	NO	NO
03-04/11/2014	0,177	1,278	0	NO	NO
08/11/2014	0,097	1,762	0	NO	NO
11/11/2014	0,119	1,769	0	NO	NO
14-15/11/2014	0,091	1,410	0	NO	NO
23/11/2014	X ²	X ²	1	NO ¹	SI
25-30/11-01/12/2014	0,250	0,402	2	SI (NASA)	SI
04/12/2014	0,066	1,678	0	NO	NO
14-15/12/2014	0,207	1,371	0	SI (NASA)	SI
28/12/2014	0,072	0,802	0	NO	NO

Tabla C.7. Tabla de datos de 2014.

²No se dispone de los datos de ninguno de los días del episodio.

08/11/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/11/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15/11/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/11/2014	0	0	1	0	1	0	2	2	2
25-30/11-01/12/2014	1	1	1	1	1	1	5	3	4
04/12/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15/12/2014	0	0	0	1	1	0	2	2	2
28/12/2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.8. Métodos discretos aplicados a los datos de la *Tabla C.7.*

C.5. Datos de 2013

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10
19/01/2013	0,045	0,788	0	NO ¹	NO
22-24/01/2013	0,035	0,700	0	NO	NO
27/01/2013	0,070	0,393	0	NO	NO
02/02/2013	0,020	1,399	0	NO	NO
11/02/2013	0,028	1,548	0	NO	NO
17/02/2013	0,642	1,221	0	SI (NASA)	NO
19-20/02/2013	0,187	1,127	1	SI (NASA)	NO
22-23/02/2013	0,062	0,658	0	NO ¹	NO
27/02-01/03/2013	0,044	1,650	0	SI (NASA)	NO
03-05/03/2013	0,122	1,052	2	SI (NASA)	SI
07/03/2013	0,051	0,909	0	NO ¹	NO
09/03/2013	0,039	0,669	0	NO	NO
12-13/03/2013	0,038	1,411	0	NO	NO
17/03/2013	0,445	0,499	3	NO ¹	NO
19/03/2013	0,071	1,223	0	NO	NO
24/03/2013	0,029	1,040	0	NO	NO
26-27/03/2013	0,040	0,747	0	NO	NO
31/03-01/04/2013	0,049	0,831	0	NO	NO

03-05/04/2013	0,077	0,791	0	NO	NO
20/04/2013	0,250	1,008	0	NO ¹	NO
22/04/2013	0,257	1,030	0	NO ¹	NO
25-28/04/2013	0,178	0,659	4	SI	NO
30/04/2013	0,199	0,723	0	NO ¹	NO
09/05/2013	0,157	1,442	0	NO	NO
14-18/05/2013	0,194	0,743	1	SI	NO
24/05/2013	0,175	1,432	0	SI (NASA)	NO
27/05/2013	0,195	0,987	0	SI (NASA)	NO
05/06/2013	0,160	0,638	3	SI (NASA)	NO
09/06/2013	0,074	1,302	0	NO	NO
17-18/06/2013	0,375	0,617	3	SI	NO
09/07/2013	0,250	1,535	0	SI (NASA)	NO
13/07/2013	0,167	0,614	2	SI (NASA)	NO
22/08/2013	0,347	0,964	1	SI (NASA)	NO
26-29/08/2013	0,508	1,012	0	SI (NASA)	NO
05/09/2013	0,230	1,433	0	NO	NO
07-10/09/2013	0,330	1,083	2	SI	NO
27-28/09/2013	0,216	0,592	2	SI	NO
30/09/2013	0,045	0,541	0	NO ¹	NO
03/10/2013	0,154	0,511	0	SI (NASA)	NO
06/10/2013	0,193	1,116	0	NO	NO
22/10/2013	0,248	0,761	0	NO	NO
14/11/2013	0,120	1,744	0	NO ¹	NO
18/11/2013	0,041	1,646	0	NO ¹	NO
26-28/11/2013	0,131	1,641	0	NO ¹	NO
01/12/2013	0,063	1,586	0	NO ¹	NO
03/12/2013	0,038	1,528	0	NO ¹	NO
14/12/2013	0,212	1,407	0	NO	NO
19-21/12/2013	0,031	0,945	0	NO ¹	NO
24-25/12/2013	0,100	1,362	0	NO ¹	NO

Tabla C.9. Tabla de datos de 2013.

Fecha	AOD	α	BSC	SAT	PM10	CIMEL	TOT1	TOT2	TOT3
19/01/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
22-24/01/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
27/01/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
02/02/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/02/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/02/2013	1	0	0	1	0	0	2	1	1
19-20/02/2013	1	0	1	1	0	0	3	2	2
22-23/02/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
27/02-01/03/2013	0	0	0	1	0	0	1	1	1
03-05/03/2013	0	0	1	1	1	0	3	3	3
07/03/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09/03/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
12-13/03/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/03/2013	1	1	1	0	0	1	3	1	2
19/03/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/03/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26-27/03/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
31/03-01/04/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03-05/04/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
20/04/2013	0	0	0	1	1	0	2	2	2
22/04/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25-28/04/2013	0	1	1	1	0	0	3	2	2
30/04/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
09/05/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-18/05/2013	0	1	1	1	0	0	3	2	2
24/05/2013	0	0	0	1	0	0	1	1	1
27/05/2013	0	0	0	1	0	0	1	1	1
05/06/2013	0	1	1	1	0	0	3	2	2
09/06/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17-18/06/2013	1	1	1	1	0	1	4	2	3
09/07/2013	0	0	0	1	0	0	1	1	1

13/07/2013	1	1	1	1	0	1	4	2	3
22/08/2013	1	0	1	1	0	0	3	2	2
26-29/08/2013	1	1	0	1	0	1	3	1	2
05/09/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07-10/09/2013	1	0	1	1	0	0	3	2	2
27-28/09/2013	0	1	1	1	0	0	3	2	2
30/09/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
03/10/2013	0	1	0	1	0	0	2	1	1
06/10/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/10/2013	0	1	0	0	0	0	1	0	0
14/11/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/11/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26-28/11/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01/12/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03/12/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/12/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19-21/12/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24-25/12/2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla C.10. Métodos discretos aplicados a los datos de la *Tabla C.9*.